

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ
UNIVERZITA OSTRAVA**

Hornicko – geologická fakulta

Katedra environmentálního inženýrství

**VLIV VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA ŽIVOTNÍ
PROSTŘEDÍ A MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ JEJICH
INSTALOVANÉHO VÝKONU V ČESKÉ REPUBLICE**

bakalářská práce

Autor:

Michael Mader

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Vladimír Lapčík, CSc.

Ostrava 2019

VŠB - TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA

Faculty of mining and geology

Department of environmental engineering

**IMPACT OF WIND POWER PLANTS ON THE
ENVIRONMENT AND POSSIBILITIES OF INCREASING
OF THEIR INSTALLED OUTPUT IN THE CZECH
REPUBLIC**

bachelor thesis

Author:

Michael Mader

Supervisor:

prof. Ing. Vladimír Lapčík, CSc.

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Katedra environmentálního inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Michael Mader**
Studijní program: B2102 Nerostné suroviny
Studijní obor: 3904R005 Environmentální inženýrství
Téma: **Vliv větrných elektráren na životní prostředí a možnosti zvýšení jejich instalovaného výkonu v České republice**
Impact of Wind Power Plants on the Environment and Possibilities of Increasing of Their Installed Output in the Czech Republic
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Větrné elektrárny v České republice a v Evropě
3. Technické řešení současných větrných elektráren
4. Vlivy větrných elektráren na životní prostředí
5. Možné scénáře rozvoje větrné energetiky na území České republiky
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

LAPČÍK, Vladimír. *Průmyslové technologie a jejich vliv na životní prostředí* (monografie). Ostrava: VŠB-TU, HGF, IEI, 2009. ISBN 978-80-248-2015-6. 362 s.
LAPČÍK, Vladimír. *Wind Farms and Their Impact on the Environment* (kapitola v knize). In: Wind Farm - Technical Regulations, Potential Estimation and Siting Assessment/Book 1 (book edited by Gastón Orlando Suvire). Chorvatsko, Rakousko: InTech, 2011, s. 141 – 162 (22 s.). ISBN 978-953-307-483-2.
PARDALOS, Panos M., REBENNACK, Steffen, PEREIRA, Mario V. F., ILIADIS, Niko A., CETKOVSKÝ, Stanislav, FRANTÁL, Bohumil, ŠTEKL, Josef (2010). *Větrná energie v České republice: Hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí*. Akademie věd ČR. 208 p. ISBN 978-80-86407-84-5.
PAPPU, Vijay. *Handbook of wind power systems*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2014, 852 s. ISBN 978-364-2410-802.
Firemní prospekty
Časopisecké zdroje

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Vladimír Lapčík, CSc.**

Datum zadání: 31.10.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Silvie Heviánková, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.
děkan fakulty

Prohlášení autora bakalářské práce

- Celou bakalářskou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.
- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že bakalářské práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 30. 4. 2019


.....

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Vladimíru Lapčíkovi, CSc. za odbornou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování této bakalářské práce. Zároveň bych tímto rád poděkoval své rodině za podporu v průběhu celého bakalářského studia.

Anotace

Předložená bakalářská práce pojednává o větrných elektrárnách, jejich technickém řešení a jejich vlivu na životní prostředí. Dále popisuje význam větru jako obnovitelného zdroje energie a historii větrné energetiky. Obsahuje také statistický přehled o větrné energetice na území Evropy a České republiky za rok 2018. V závěru popisuje předpokládaný vývoj větrné energetiky na území České republiky v následujících letech.

Klíčová slova: větrná elektrárna, betonový základ, stožár, gondola, rotor, instalovaný výkon, vlivy na životní prostředí

Summary

The submitted bachelor thesis deals with wind power plants, their technical solution and their impact on the environment. Then there is a description of value of wind such as renewable resource of energy and the history of wind energy. Bachelor thesis contains the statistical overview about wind energy in Europe and the Czech Republic for 2018. In the final section of bachelor thesis there is a presumed development of wind energy in the Czech Republic in the following years.

Key words: wind power, concrete foundation, tower, nacelle, rotor, installed output, environment impacts

OBSAH

1	Úvod	1
2	Význam větru jako obnovitelného zdroje energie	2
3	Předchůdci a historie větrných elektráren	3
3.1	Větrné mlýny.....	3
3.2	Větrná čerpadla	4
3.3	První větrná elektrárna	4
3.4	První evropská větrná elektrárna.....	5
3.5	Vývoj větrné energetiky v Dánsku.....	5
3.6	Zvyšování výkonu větrných elektráren	8
4	Větrné elektrárny a jejich technické řešení.....	10
4.1	Kategorie větrných elektráren	10
4.1.1	Malé větrné elektrárny	10
4.1.2	Střední větrné elektrárny.....	11
4.1.3	Velké větrné elektrárny.....	11
4.2	Betonový základ větrných elektráren.....	11
4.2.1	Betonový základ větrné elektrárny Vestas V90 - 2 MW	12
4.3	Stožár větrných elektráren.....	15
4.3.1	Ocelový tubusový stožár.....	15
4.3.2	Příhradový stožár	20
4.3.3	Prefabrikovaný betonový stožár	22
4.4	Gondola větrné elektrárny.....	23
4.4.1	Převodovka	24
4.4.2	Generátor	27

4.4.3	System natáčení strojovny	28
4.4.4	Hydraulické systémy	30
4.4.5	Transformátor	30
4.5	Rotor větrné elektrárny	31
4.5.1	Rozdělení rotorů	32
4.5.2	Konstrukce a výroba rotorových listů	33
4.5.3	Vyhřívání rotorových listů	34
4.5.4	Způsoby regulace výkonu dodávaného rotorem	35
5	Větrné elektrárny v České republice a v Evropě	39
5.1	Větrné elektrárny v Evropě	39
5.1.1	Větrné elektrárny v Evropě v roce 2018	39
5.2	Větrné elektrárny v České republice	42
5.2.1	Vývoj instalovaného výkonu větrných elektráren v České republice	43
5.2.2	Rozmístění větrných elektráren v České republice podle krajů	44
5.2.3	Výrobci větrných elektráren v České republice	45
6	Vlivy větrných elektráren na životní prostředí	47
6.1	Hluk	47
6.2	Vlivy na krajinný ráz	49
6.3	Vliv na tahové cesty a hnízdění ptáků, vliv na faunu, flóru a ekosystémy	51
6.4	Stroboskopický efekt	53
6.5	Vlivy na půdu a povrchové a podzemní vody	53
6.6	Ostatní vlivy	54
7	Možné scénáře rozvoje větrné energetiky na území České republiky	55
8	Závěr	57
	Seznam použité literatury	1

Seznam použitých zkratek	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10

1 ÚVOD

Vítr představuje snadno dostupný obnovitelný zdroj elektrické energie. Obor, zabývající se výrobou elektrické energie z energie větru, se nazývá větrná energetika. Technické zařízení, vyrábějící elektrickou energii transformací kinetické energie větru, se nazývá větrná elektrárna. Právě větrným elektrárnám je věnována pozornost v této bakalářské práci.

I když jsou v současné době zásoby fosilních paliv stále dostatečné, je nutné mít na paměti, že se jedná o neobnovitelné zdroje. Není třeba se těchto energetických zdrojů vzdávat, nicméně aby k jejich vyčerpání došlo co nejpozději, je vhodné získávat energii také z jiných zdrojů - obnovitelných. V posledních letech se stále více klade důraz na to, aby získávání, respektive výroba energie, probíhala způsobem šetrným k životnímu prostředí. Jednou z cest k naplnění tohoto požadavku představuje větrná energie.

V této bakalářské práci je nejprve popsán význam větru jako obnovitelného zdroje. Další kapitola poskytuje stručný přehled o historii využívání energie větru, kde jsou popsána zařízení, která lze označit jako předchůdce větrných elektráren, dále první větrná elektrárna na území Ameriky a Evropy, jsou uvedeny stručné popisy prototypů větrných elektráren. Čtvrtá kapitola je zaměřena na technické řešení současných větrných elektráren, kde jsou podrobně popsány jednotlivé části větrné elektrárny - betonový základ, stožár, gondola a rotor. Pátá kapitola se zabývá aktuálními informacemi o větrné energetice na území Evropy a následně na území České republiky, v níž je uveden novodobý vývoj větrných elektráren a současně statistika instalovaného výkonu a produkce elektrické energie v Evropě a v České republice za rok 2018. V šesté kapitole je zkoumáno, zda větrné elektrárny nějakým negativním způsobem ovlivňují životní prostředí, případně zda naopak životní prostředí ovlivňují pozitivním způsobem. V sedmé kapitole je snahou předpovědět, jak se bude větrná energetika v nejbližších letech vyvíjet v České republice.

Zejména mezi laickou veřejností je rozšířeno několik mýtů o větrných elektrárnách, nejvíce ohledně dopadů na životní prostředí. Cílem této bakalářské práce je vyvrácení těchto mýtů a uvedení věci na pravou míru.

2 VÝZNAM VĚTRU JAKO OBNOVITELNÉHO ZDROJE ENERGIE

V roce 1973 nastala v Evropě energetická krize, která byla vyvolána embargem zemí OPEC na vývoz ropy do hospodářsky vyspělých států. Tato energetická krize se stala přímým podnětem pro rozvoj větrné energetiky v Evropě. Státy s omezenými vlastními energetickými zdroji klasického typu začaly hledat možnosti, jak v širším měřítku získat energii z obnovitelných zdrojů, včetně energie větru. Průkopníkem rozvoje větrné energetiky v Evropě se stalo Dánsko, kde se koncem osmdesátých let minulého století začaly budovat první větrné elektrárny. [1]

Větrná energetika využívá nevyčerpatelné kinetické energie větru, jejíž obrovskou výhodou je, že je zcela zdarma, a tím pádem nepodléhá inflaci. Rovněž se snižuje závislost na dovozu energetických surovin, zejména z oblastí, ve kterých panuje politická nestabilita. [1]

Větrná energetika má oproti jaderné a tepelné energetice několik velmi podstatných výhod. První výhodou spočívá v maximální šetrnosti k životnímu prostředí, a to jak z hlediska ochrany klimatu, tak z hlediska ochrany vod. Větrné elektrárny totiž neznečišťují ovzduší ani vodu. Pokud by se například v severních Čechách vybudovaly větrné elektrárny o celkovém výkonu 300 MW, snížilo by se oproti uhelným elektrárnám zatížení životního prostředí o 750 000 tun oxidu uhličitého, 3 600 tun oxidů dusíku, 420 000 tun prachových částic a 42 000 tun škváry a popílku. Druhou podstatnou výhodou větrných elektráren je výrazně rychlejší energetická návratnost, než u jaderných a uhelných elektráren. Větrná elektrárna vyrobí stejné množství energie, které bylo spotřebováno na její výrobu, přibližně za 6 až 12 měsíců, přičemž životnost větrných elektráren je průměrně 20 let. Výhodou je rovněž minimální zatížení stanoviště při výstavbě větrných elektráren, která trvá přibližně po dobu jednoho měsíce. Demontáž větrné elektrárny trvá 2 až 3 dny a stavba nezanechá v terénu téměř žádné následky. Větrné elektrárny představují typický příklad polyfunkčního využití ploch, umožňují využití zemědělské půdy téměř v původním rozsahu jak pro pěstování plodin, tak pro pastevecké účely. [1]

3 PŘEDCHŮDCI A HISTORIE VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Energie větru byla využívána k mechanické práci již několik tisíc let před naším letopočtem. Vítr byl využíván jako pohon primitivních plachetnic a jeho energie sloužila také k otáčení rotorů u prvních větrných mlýnů. Právě větrné mlýny byly spolu s větrnými čerpadly prapředkem větrných elektráren. [2]

3.1 Větrné mlýny

Podstatným rozdílem mezi větrnými elektrárnami a větrnými mlýny je ten, že větrné mlýny nevyráběly elektrickou energii, nýbrž přeměňovaly větrnou energii na mechanickou práci. [2]

Druhým zásadním rozdílem odlišujícího větrné mlýny od větrných elektráren jsou způsoby regulace chodu těchto zařízení. Větrné mlýny využívaly tlak větru na plochu křídel nebo lopatek, kdežto větrné elektrárny využívají aerodynamických vlastností profilů křídel, které jsou přesně definovány. Rozlišovaly se dva druhy větrných mlýnů, a to podle toho, jakým způsobem se natáčely proti větru. Sloupové větrné mlýny se proti větru natáčely celé. U holandských větrných mlýnů se proti větru natáčela pouze jejich střešní část s křídly. Natáčení bylo prováděno ručně, pomocí jednoduchých vnějších nebo vnitřních mechanismů. Výjimkou byla pouze poslední etapa existence větrných mlýnů, kdy u holandských mlýnů bylo natáčení střešní části prováděno i automaticky. V případě větrných elektráren se proti větru natáčí gondola se strojovnou a lopatkami rotoru. Navíc u některých typů větrných elektráren dochází k regulaci výkonu i natáčením lopatek rotoru podle jejich podélné osy. [2]

První historicky doložené větrné mlýny byly větrné mlýny s vertikální osou otáčení rotoru. Později však byly nahrazeny větrnými mlýny s horizontální osou otáčení rotoru. První zmínky o větrných mlýnech s horizontální osou otáčení rotoru byly nalezeny v historických dokumentech z Persie, Tibetu a Číny pocházejících přibližně z roku 1000 našeho letopočtu. Tento typ větrného mlýna měl horizontální hřídel a lopatky (případně plachty) otáčející se ve vertikální rovině. Z Persie a Blízkého východu se větrné mlýny rozšířily přes oblast Středomoří a střední Evropu do celé Evropy. V Anglii byl první větrný mlýn postaven okolo roku 1150, ve Francii v roce 1180, v Německu v roce 1222 a v Dánsku v roce 1259. [3]

Kolem roku 1800 bylo ve Francii v provozu přibližně 20 000 větrných mlýnů a v Nizozemsku 90 % energie spotřebované v průmyslovém odvětví tvořila větrná energie. Vlivem industrializace následně došlo k pozvolnému poklesu počtu větrných mlýnů, přesto ještě v roce 1904 měla větrná energie podíl 11 % na celkové energii spotřebované v holandském průmyslu a v Německu bylo tou dobou v provozu více než 18 000 větrných mlýnů. [3]

Využívání větrné energie má dlouholetou tradici i na území dnešní České republiky. Podle historických dokumentů byl první větrný mlýn na území našeho státu vybudován již v roce 1277 v Praze, konkrétně v zahradě Strahovského kláštera. Informace o prvním vybudovaném větrném mlýnu na území Moravy a Slezska pochází z roku 1340, nacházel se na Opavsku. Celkově o historii větrných mlýnů na území dnešní České republiky až do 17. století není mnoho historických dokumentů. V roce 1784 byl vydán dvorský dekret o zřizování větrných mlýnů, který sledoval, aby každá obec měla svůj větrný mlýn. To vedlo k rozvoji využívání energie větru pomocí větrných mlýnů, například na území Moravy a Slezska byla v té době doložena existence třiceti větrných mlýnů. Největší rozkvět větrného mlynářství v Čechách nastal v prvních dvou třetinách 19. století. Na Moravě a ve Slezsku to bylo v poslední třetině 19. století a na začátku 20. století. Celkově je na území dnešní České republiky historicky doloženo 879 větrných mlýnů, přičemž 681 z nich se nacházelo, respektive nachází na území Moravy a Slezska. [1], [4], [5]

3.2 Větrná čerpadla

Větrná čerpadla představovala, stejně jako větrné mlýny, jistý stupeň vývoje na cestě ke konstrukci větrných elektráren. Dodnes představují neuzavřenou kapitolu jako zdroje mechanické práce využitím větrné energie. Větrné čerpadlo bylo v podstatě dřevěné nebo ocelové větrné kolo s velkým množstvím lopatek. Typická jsou pro Severní Ameriku, několik jich však najdeme i v České republice, sloužící jako technické památky. [2]

3.3 První větrná elektrárna

Za vynálezce větrné elektrárny jsou považováni Američan Charles F. Brush a Dán Poul la Cour. [2]

První větrná elektrárna na světě byla postavena Charlesem F. Brushem na přelomu let 1887 a 1888 v Clevelandu (ve státě Ohio). Byla to automatická větrná turbína napojená

na generátor elektrického proudu. Rotor této větrné elektrárny byl tvořen 144 paprskovitě uspořádanými lopatkami z cedrového dřeva a hodnota jeho průměru činila 17 metrů. Generátor dosahoval výkonu 12 kW při 500 otáčkách za minutu. [2]

Tato větrná elektrárna byla výkonově i technologicky pokročilejší než první evropská větrná elektrárna, která byla vybudována v Dánsku o tři roky později. [2]

3.4 První evropská větrná elektrárna

První větrnou elektrárnu v Evropě zkonstruoval v roce 1891 dánský vědec Poul la Cour, a to v dánské obci Askov, která se nachází na jihu Jutského poloostrova. Rotor elektrárny byl tvořen čtyřmi až šesti "lopatkami", což byly plachty napnuté na rámové konstrukci. Poul la Cour také vybudoval první zkušební větrný tunel pro testování modelů větrných motorů, jehož kompresor měl parní pohon. [2]

Poul la Cour se nezaměřoval jen na větrné elektrárny jako takové, ale zabýval se i možnostmi akumulace energie vyrobenou větrnými elektrárnami pro období bezvětrí. Jeho řešením byla výroba vodíku elektrolýzou vody. V roce 1900 postavil v Askově elektrolyzátor tvořený deseti trubicemi, ve kterých elektrolýza probíhala. Elektrolyzátor byl schopen za hodinu vyrobit až 1000 litrů vodíku a 500 litrů kyslíku. Vyrobený vodík se uplatnil jako zdroj energie pro svítidla na lidové univerzitě v Askově, jejichž tvůrcem byl rovněž Poul la Cour (který zároveň na této univerzitě působil). Poul la Cour vybudoval několik typů větrných elektráren na střeše objektu, v němž prováděl výzkum, přičemž poslední zkušební větrná elektrárna byla ze střechy objektu demontována v roce 1929. [2]

3.5 Vývoj větrné energetiky v Dánsku

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, průkopníkem rozvoje větrné energetiky v Evropě se stalo Dánsko, které je zároveň jedinou zemí s nepřetržitým vývojem, výrobou a rozsáhlým využíváním větrných elektráren od doby jejich vynálezu až do současnosti. Rozšíření lokálních větrných zdrojů energie bylo reakcí na nedostatek energetických surovin v době první světové války. V roce 1919 byl dánskému inženýrovi Povlu Vindigovi udělen patent na první moderní větrnou elektrárnu s názvem Agrikko, jejíž rotor pracoval na aerodynamickém principu. Během provozu této větrné elektrárny bylo zjištěno, že účinnost aerodynamické vrtule je o 50 % vyšší oproti klasické lopatkové vrtuli s identickou účinnou plochou. Koncem dvacátých let minulého století došlo v Dánsku k

rozšíření malých "faremních" větrných elektráren, které sloužily jako zdroj energie zejména v tzv. ostrovním provozu, to znamená v místech bez připojení k elektrické síti. "Faremní" větrné elektrárny, jak již název napovídá, vyráběly elektrickou energii především pro zemědělské stroje, dále pro pily, čerpadla a tak dále. Prognóza rozvoje větrné energetiky v Dánsku během následujících let však nebyla příliš optimistická z důvodu konkurence kapalných paliv a dalších energetických surovin, které kromě ekonomické stránky měly výhodu také v okamžité přístupnosti elektrické energie. [2]

Pokrok ve vývoji nastal během druhé světové války, kdy firma Knuda Lykkegaarda vybudovala v letech 1940 až 1945 přibližně 70 větrných elektráren s průměrem rotoru v rozmezí od 14-ti do 18-ti metrů. Elektrárny disponovaly výkonem v rozpětí 30 až 40 kW. [2]

V letech 1941 - 1942 postavila dánská firma F. L. Smidth větrnou elektrárnu, která může být považována za předchůdce moderních větrných elektráren. Tato elektrárna byla výjimečná tím, že jako vůbec první měla moderní aerodynamický profil listů rotoru. [3]

V rámci vývoje větrných elektráren je důležité zmínit jednu větrnou elektrárnu, která nesouvisí s vývojem v Dánsku. V roce 1941 postavil Američan Palmer Putnam v americkém státě Vermont obří větrnou elektrárnu pro americkou společnost Morgan Smith Co. s průměrem rotoru 53 metrů. Tato elektrárna byla kromě nadstandardní velikosti rotoru unikátní zejména tím, že jako první překonala výkon jednoho megawattu - konkrétně to bylo 1,25 MW. Elektrárna ovšem (i přes své parametry) neměla velký úspěch a v roce 1945 byla demontována. [3], [6]

"Odrazovým můstkem" ke konstrukci moderních větrných elektráren se stal tzv. Gedserský mlýn (pojmenovaný podle nejjižnějšího dánského města Gedser). I když byl označen jako mlýn, jednalo se o větrnou elektrárnu na střídavý proud. Zkonstruoval ji inženýr Johannes Juul (mimo jiné absolvent kurzů Poula la Coura v Askově) v polovině 20. století. Stavba zahrnovala několik větrných elektráren v okolí již zmíněného města Gedser, kterým jako podstavy posloužily betonové věže. Rotor elektráren byl tvořen třemi listy a jeho průměr měl hodnotu 24 až 27 metrů. Elektrárny dosahovaly výkonu 200 kW a v provozu byly od roku 1957 do roku 1967. Za tuto dobu celkově vyrobily přibližně 2,2 GWh elektrické energie. Část těchto elektráren byla v 80. letech minulého století

inovována, kdy došlo k výměně celé strojovny včetně rotoru, převodovky, generátoru a způsobu regulace. Betonový stožár zůstal zachován. [2], [3]

Rozvoj větrné energetiky byl podpořen ropnou krizí, která nastala v roce 1973. V důsledku prudkého zvýšení ceny ropy se nejen v Dánsku, ale v celé Evropě zvýšil zájem o alternativní zdroje energie, zejména o větrnou energii. Ropná krize postihla například dánskou firmu Nordtank, která se od roku 1962 specializovala na výrobou cisteren k přepravě a skladování ropy. Z důvodu, aby se firma zachránila před krachem, přešla od výroby cisteren k výrobě větrných elektráren, přičemž na jejich výrobu byl použitý materiál původně určený na výrobu cisteren. Z kovových trub původně určených na výrobu cisteren byl jejich svařením a osazením přesnými přírubami (na jednom konci pro ukotvení na betonový základ a na druhém konci přizpůsobenými pro otočné uložení gondoly větrné elektrárny) vyroben stožár větrné elektrárny. Firma vyrobila první větrnou elektrárnu s výkonem 30 kW v roce 1979, a o pouhý rok později vyrobila větrnou elektrárnu disponující výkonem 55 kW. Firma, která se původně zabývala ropným odvětvím se tak stala významným vývozcem těchto strojů nejen do evropských států, ale také do USA. [2]

Důležitou událostí ve vývoji větrných elektráren byla konstrukce větrné elektrárny v obci Tvinde (nacházející se na západním pobřeží Jutského poloostrova v Dánsku). Tato elektrárna byla dokončena v roce 1977 a výjimečná byla tím, že svým výkonem několikanásobně překonala všechny větrné elektrárny, které byly toho času v provozu. Její instalovaný výkon byl na tu dobu neuvěřitelný - 2 MW, nicméně z důvodu možností rozvodné sítě, do níž byla elektrárna připojena, musel být její výkon omezen na 960 kW. I tak se ale z hlediska výkonu jednalo o unikátní elektrárnu. Betonový stožár elektrárny je vysoký 53 metrů, rotor elektrárny o průměru 54 metrů je tvořen třemi listy. Převodovka a generátor elektrárny byly vyrobeny v 50. letech minulého století, hlavní osa původně poháněla lodní šroub, gondola byla zkonstruována svařením ocelových plátů. V roce 1993 byly původní listy rotoru nahrazeny novými, které měly aerodynamičtější profil. Tato elektrárna dodnes vyrábí elektřinu, přičemž během celého jejího provozu nebyly zaznamenány závažnější problémy. [2]

3.6 Zvyšování výkonu větrných elektráren

Od 80. let minulého století docházelo k postupnému zvyšování výkonu vyráběných větrných elektráren [2], v Tabulce 1 je uveden vývoj výkonu a velikosti průměru rotoru u komerčně vyráběných větrných elektráren v době od roku 1985 do roku 2004.

Tabulka 1 Vývoj výkonu a průměru rotoru větrných elektráren v letech 1985 - 2004 [3]

Rok	Výkon větrné elektrárny (kW)	Průměr rotoru větrné elektrárny (m)
1985	50	15
1989	300	30
1992	500	37
1994	600	46
1998	1 500	70
2003	3 000 - 3 600	90 - 104
2004	4 500 - 5 000	112 - 128

V důsledku ropné krize byla zavedena finanční podpora pro výzkum a vývoj větrné energetiky, díky které se tento obor stal dostupnějším a kromě běžných komerčně vyráběných větrných elektráren bylo vybudováno také několik prototypů experimentálních větrných elektráren, jejichž úkolem bylo zjistit limitní schopnosti větrných elektráren, jednak z hlediska technických možností, a jednak z hlediska meteorologických extrémů, za účelem maximálního využití potenciálu energie větru. Z tohoto důvodu měly experimentální větrné elektrárny vyšší výkon než komerčně vyráběné. [2], [3]

Jedna taková experimentální větrná elektrárna byla vybudována na konci 80. let ve Švédsku, poblíž města Malmö. Nesla označení WTS-3 (Wind Turbine System 3) a její výkon měl hodnotu 3 MW. Stožár byl ocelový a měřil 77 metrů. Rotor elektrárny o průměru 77 metrů byl tvořen dvěma listy, přičemž jeden list vážil 14 tun. Výsledkem pozorování bylo, že elektrárna byla v provozu ročně 6 500 hodin a za tu dobu vyrobila až 8 GWh elektrické energie. Po úspěšném splnění svého účelu byla demontována. [2]

Ve Švédsku byla postavena ještě jedna experimentální větrná elektrárna na ostrově Gotland, jejíž výkon činil 2 MW. Dále byly experimentální větrné elektrárny vybudovány v Německu, na Orknejských ostrovech, v Dánsku a také v USA. [2]

4 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A JEJICH TECHNICKÉ ŘEŠENÍ

Větrná elektrárna je technické zařízení, jehož úkolem je přeměnit kinetickou energii větru na energii elektrickou. V první fázi dochází k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci otáčejícího se rotoru, a následně ve druhé fázi díky otáčejícímu se rotoru dochází (přes převodový mechanismus) k pohonu elektrického generátoru, v němž probíhá transformace mechanické práce na konečný produkt - elektrickou energii. [1], [7], [8], [9]

4.1 Kategorie větrných elektráren

Větrné elektrárny můžeme rozdělit do tří kategorií - malé, střední a velké. O tom, do které kategorie větrná elektrárna spadá, rozhoduje průměr jejího rotoru a nominální výkon, kterým daná větrná elektrárna disponuje. [1], [9]

4.1.1 Malé větrné elektrárny

Mezi malé větrné elektrárny řadíme turbíny, jejichž nominální výkon nepřesahuje 60 kW a průměr rotoru nepřesahuje 16 m. Tuto kategorii větrných elektráren je možné rozdělit do dvou podkategorií. [9], [10]

První podkategorii představují mikrozdroje, které jsou určeny výhradně pro dobíjení baterií. Jedná se o turbíny s nominálním výkonem do 2,5 kW a průměrem rotoru od 0,5 do 3 m, které běžně pracují se stejnosměrným napětím 12 - 24 V. Energii vyrobenou těmito turbínami a následně akumulovanou v bateriích lze použít například jako zdroj pro komunikační systémy, radiové a televizní přijímače, ledničky a další elektrické spotřebiče a osvětlení. [9], [10]

Druhou podkategorii malých větrných elektráren tvoří turbíny, jejichž nominální výkon se pohybuje od 2,5 do 10 kW a průměr rotoru od 3 do 8 m. S první podkategorií mají společnou vlastnost, kterou je provoz v ostrovním režimu (to znamená, že nejsou připojeny do rozvodné sítě). Hodnota výstupního napětí u těchto zařízení se standardně pohybuje v intervalu od 48 do 220 V. Energie vyrobená větrnými turbínami spadající do této podkategorie je vhodná pro účely vytápění či temperování domů, pro ohřev vody nebo pro pohon motorů. V roce 2002 byla publikována analýza prokazující ekonomickou neefektivnost výroby elektrické energie těmito turbínami pro potřeby rodinných domů

nebo jiných menších objektů, které lze připojit do rozvodné sítě. Jsou proto vhodné pro výrobu elektrické energie pouze na místech, kde není možné připojení do rozvodné sítě, a navíc vyžadují průměrnou roční rychlost větru minimálně 4,5 m/s ve výšce 10 m. Z ekonomického hlediska je rovněž neefektivní výroba elektrické energie těmito turbínami za účelem prodeje rozvodným firmám v důsledku výrazně vyšších měrných nákladů. [9], [10]

4.1.2 Střední větrné elektrárny

Současná kategorie střední větrné elektrárny v minulosti spadala do kategorie velké větrné elektrárny, avšak v důsledku vývoje v oblasti rozměrů vrtulí a nominálních výkonů větrných elektráren se vyčlenila jako samostatná kategorie. Průměr vrtule v této kategorii větrných elektráren se pohybuje v rozsahu 16 až 45 m a jejich nominální výkon dosahuje 60 až 750 kW. [9], [10]

4.1.3 Velké větrné elektrárny

Do této kategorie patří největší větrné elektrárny, jejichž rotor disponuje průměrem od 45 do 164 m a nominální výkon má rozpětí 750 kW až přibližně 9 000 kW. Větrné elektrárny disponující nominálním výkonem vyšším než 3 000 kW jsou ve většině případů určené pro umístění a provoz v mořských vodách (tzv. off-shore větrné elektrárny). [9], [10]

4.2 Betonový základ větrných elektráren

Před montáží samotné větrné elektrárny je nutné vybudovat její betonový základ. Jedná se o nejméně viditelnou, avšak nejtěžší část větrné elektrárny. Například hmotnost betonového základu u větrné elektrárny Vestas V90, disponující výkonem 2 MW, je 1 144 tun, přičemž celková hmotnost stožáru, gondoly a rotoru této větrné elektrárny je 331 tun. [11]

Před výstavbou betonového základu je nezbytné provést důkladný geologický průzkum, z důvodu zjištění stability prostředí ve spodních vrstvách půdy. Větrná elektrárna je velmi vysoká stavba, a tudíž má také vysoko položené těžiště. To způsobuje, že je velmi citlivá na vychýlení ze své rovnovážné polohy. V případě zjištění, že podloží tvoří spraš, musí se přistoupit k úpravě tohoto podloží. Problém spraše spočívá v závislosti jeho

objemu na vlhkosti, kdy svůj objem může změnit až o 12 %. Úprava spočívá v dodatečném zhutnění základové spáry promícháním s cementem. Například se vykope zemina o hloubce 50 cm, která se promíchá s cementem a znovu zhutní na místě. Tímto způsobem se vytvoří stabilní základová spára. [11]

4.2.1 Betonový základ větrné elektrárny Vestas V90 - 2 MW

Kompletní výstavba betonového základu včetně rozměrů bude popsán na modelu větrné elektrárny Vestas V90 - 2 MW. Její betonový základ je čtvercového tvaru o délce strany 15,9 m. Na okrajích má výšku 1,8 m a ve středu 2 m. [11]

Výstavba začíná odkrytím základové spáry (viz Obrázek 1), na níž se vybuduje betonová deska hrubá přibližně 8 cm. Ta vytvoří pevný a rovný podklad, na kterém se po ztuhnutí usadí ocelový fundament stožáru neboli základový ocelový kruh. Fundament má průměr přibližně 4 m a jeho hmotnost je přibližně 28 tun. Ve fundamentu se nacházejí kruhové otvory pro armování a rovněž potrubí určené pro vyvedení kabelů. Obvykle se fundament „ustavuje“ na distančních šroubech, aby byla zajištěna jeho vodorovná poloha. [11]



Obrázek 1 Odkrytá základová spára [11]

Poté přichází na řadu armování neboli vyztužování, při kterém se spotřebuje 40 tun ocelové výztuže. Při tomto procesu se zároveň instaluje potrubí k vyvedení kabelů k přípojnému místu do sítě. Nakonec se celá armatura důkladně uzemní. [11]

Následně dochází k zalití základu betonem, kterého je v případě tohoto modelu větrné elektrárny potřeba okolo 500 m³. Toto množství představuje v závislosti na kapacitě domíchávače betonu 60 až 80 vozidel. Betonování základu začíná hned za svítání a probíhá nepřetržitě. V některých případech se na místě základu instaluje noční osvětlení (viz Obrázek 2), aby bylo možné bez přerušení pokračovat v betonování základu i v noci, jelikož celý objem základu musí být vybetonován najednou. Beton musí být řádně zhutněn, a to zejména v oblasti fundamentu, aby při následném provozu větrné elektrárny nebyla porušena soudržnost. [11]



Obrázek 2 *Noční osvětlení betonovaného základu [11]*

V další fázi se vyčká na dokonalé ztuhnutí betonu, které může trvat až 5 týdnů. Hotový základ větrné elektrárny je na Obrázku 3. Poté se na celém povrchu provádí

asfaltový penetrační nátěr, a dále na oblast, kde se stýká betonový základ s fundamentem, je nanesen „plastický“ nátěr, jenž má schopnost vyrovnávat jejich vzájemné pohyby a rozdílnou teplotní roztažnost. Účelem „plastického“ nátěru je izolace styčných ploch fundamentu a betonového základu od vlhkosti. [11]



Obrázek 3 Hotový základ větrné elektrárny [11]

V poslední fázi se provádí protažení kabelů dovnitř fundamentu, zasypaní celého základu zeminou a její zhutnění. Na závěr se provedou jen finální úpravy terénu a zasetí trávy. [11]

Kromě čtvercového tvaru existují i jiné podoby betonových základů, jako například šestiboký nebo kruhový základ. Samostatnou kapitolu tvoří základy, respektive zakotvení pro offshore větrné elektrárny neboli větrné elektrárny umístěné v moři. [11]

4.3 Stožár větrných elektráren

Stožáry (někdy také označovány jako věže) větrných elektráren prošly významným vývojem. U prvních větrných elektráren dosahovaly jejich stožáry výšky přibližně 20 m, současně vyráběné větrné elektrárny mají stožáry disponující výškou 100 až 120 m. Stožáry nejvýkonnějších větrných elektráren však dosahují výšky i přes 140 m. Obecně platí, že čím vyšší je nominální výkon větrné elektrárny, tím vyšší je její stožár. [1], [9], [10]

Konstrukce vysokých stožárů má své opodstatnění. S narůstající výškou narůstá rovněž rychlost proudění větru, které je navíc ve vyšších polohách méně ovlivňováno překážky (jako například budovy, les, reliéf krajiny). Tím pádem je větrná elektrárna schopna vyprodukovat více elektrické energie. Je prokázáno, že při výšce stožáru větrné elektrárny v intervalu 80 - 100 m představuje každý metr navíc vyšší celkovou roční výrobu elektrické energie o 0,9 %. S narůstající výškou sice tento koeficient klesá, přesto ve výšce kolem 160 m stále každý metr výšky stožáru navíc zvyšuje celkovou roční výrobu elektrické energie přibližně o 0,67 %. Při výšce stožáru 160 m je větrná elektrárna schopna ročně vyprodukovat o 35 - 45 % více elektrické energie než větrná elektrárna s výškou stožáru 100 m. Proto má výška stožáru v rámci provozu větrné elektrárny důležitou roli. [12]

Existují 3 typy stožárů - ocelový tubusový, příhradový a prefabrikovaný betonový. Nejrozšířenějším typem stožáru je ocelový tubusový (viz Obrázek 4). [1], [9], [10], [13]

4.3.1 Ocelový tubusový stožár

Ocelový tubusový stožár je složen ze segmentů o délce 20 až 25 m, podle výšky stožáru. Každý segment se skládá z několika prstenců vyrobených z ocelových plátů, které jsou spojeny k sobě pomocí svařování. Stožár bývá rozdělen na segmenty z důvodu snadnější přepravy na místo výstavby větrné elektrárny, jelikož transport stožáru o délce například 100 m vcelku by představoval enormní komplikace. [13], [14]



Obrázek 4 Větrná elektrárna s ocelovým tubusovým stožárem [15]

K výrobě tubusového stožáru se používá plech o tloušťce 12 až 45 mm, u nejvyšších stožárů dokonce až 70 mm. Tloušťka plechu závisí na pozici daného segmentu ve stožáru, přičemž u paty stožáru bývá tloušťka plechu největší, a to 30 až 45 mm (u průměrně vysokého stožáru). Na vrcholu stožáru bývá plech nejtenčí, avšak jeho tloušťka musí být minimálně 12 mm. Před samotným zpracováním plechů se provádí očištění jejich povrchu od případné koroze a jiných nečistot. Následně se z těchto plechů vypalují polotovary pro skružování třemi hořáky s kyslíko-acetylenovým plamenem, přičemž jeden hořák slouží k vypalování požadovaného tvaru a další dva mají za úkol vypalovat na okrajích technologické úkosy pro pozdější svařování. Dalším procesem výroby je skružování (viz Obrázek 5), které se uskutečňuje na tříválnové, případně čtyřválnové skružovací stolicí.

Tento proces probíhá opakovaně. Pracuje se však na vývoji technologie, díky které bude možné uskutečnit proces skružování na jedno protočení materiálu. Proces skružování je zakončen kontrolou tvaru skruženého materiálu. K tomuto účelu jsou používány šablony. [14] Skružené prstence připravené pro další výrobní procesy jsou na Obrázku 6.



Obrázek 5 Proces skružování [14]

Poté přichází na řadu svařování. Před svařováním prstenců k sobě je nejprve potřeba na každém prstenci svařit jeho podélný spoj. Tomu předchází sestehování na několika místech budoucího svaru a následně se po celé délce svaru provede podvaření svařovací metodou, kdy se taví elektroda v aktivní ochranné atmosféře. Tím je docíleno toho, že prstenec nebude samovolně měnit svůj tvar a jeho podélný spoj je poté definitivně svařen metodou „svařování pod tavidlem“. U této metody svařování je oblouk zapálen mezi svařovaným spojem prstence a koncem svařovacího drátu, kdy je navíc obojí pokryto vrstvou tavidla. U části tavidla dojde k jeho roztavení za účelem vytvoření ochranného

struskového krytu nad tavnou lázní. Zbývající část tavidla, u které k roztavení nedojde, je odsáta a připravena k dalšímu použití. [14]



Obrázek 6 Skružené prstence [14]

Nyní již následuje svaření několika prstenců pro vytvoření segmentu. V první fázi se provádí přivaření kovových přírub na koncové prstence, které umožní pomocí šroubů spojit jednotlivé segmenty. Tyto příruby se vytvářejí z obdélníkového profilu skružením za tepla. Na horizontální frézce se do každé příruby vyvrtá 60 až 160 otvorů pro šrouby. Konkrétní počet závisí na průměru jednotlivé příruby a na její pozici ve stožáru. Následně se příruby horního a dolního segmentu spojí pomocí šroubů a poté se přivařují ke krajním prstencům segmentu. Jako první se přivaří jedna příruba na krajní prstenec horního segmentu a poté se k druhé přírubě přivaří krajní prstenec spodního segmentu. Dále se sestaví a následně svaří celý segment, jehož postupné svařování se odehrává ve svařovacím přípravku, jenž umožňuje rotaci segmentu kolem jeho podélné osy. Před samotným svařováním je potřeba jednotlivé prstence portálovými jeřáby umístit k sobě tak, aby k sobě přilehly po celém obvodu bez sebemenší mezery. Následně přichází na řadu úvodní zavaření kořenové housenky metodou tavící se elektrody v aktivní ochranné atmosféře a poté je celý svár svařen metodou „svařování pod tavidlem“. V současnosti se k tomuto

účelu využívá tandemový proces, při kterém jsou současně v provozu dva svařovací dráty. Při tomto procesu je rychlost svařování 70 - 80 cm za minutu. [14]

Při výrobě stožáru se provádějí 3 kontrolní metody pro zjištění případných vad materiálu - ultrazvukové testování, vizuální testování a magnetické testování. V případě, kdy se provedením kontrolních metod prokáže chyba ve svaru, je možné podle předpisů provést pouze jednu opravu nedokonale svařeného místa. [14]

Každý segment stožáru je podroben povrchové úpravě. Nejdříve se z povrchu segmentu odstraní nečistoty a následně se v rozmezí několika hodin povrch segmentu nastříká barvou, nejčastěji polyuretanovou (viz Obrázek 7). Výjimku tvoří malé stožáry, jejichž segmenty mají délku přibližně 10 m. U těch je možné jako povrchovou úpravu použít žárové zinkování. Pro použití této povrchové úpravy je však limitujícím faktorem velikost vany pro žárové zinkování, z toho důvodu je možné tuto povrchovou úpravu použít jen u malých stožárů. [14]



Obrázek 7 *Nástřik ochranné barvy na povrch segmentu stožáru [14]*

Finální fází výroby stožáru je vybavení jeho segmentů. Do každého segmentu se instaluje výstupový žebřík, kabelový rošt a technologická plošina. Do kabelového roštu jsou umístěny výkonové kabely, jejichž konce jsou zataveny z důvodu ochrany před korozí, než bude stožár postaven. Poté budou tyto kabely mezi jednotlivými segmenty navzájem propojeny. V současné době se k připevnění žebříků, roštů a dalších technologií na vnitřní stěnu stožáru používají magnety. Je to výhodné z konstrukčního i technologického hlediska. Dříve bylo nutné na vnitřní stěnu stožáru přivařit mnoho pomocných platí a výstupků, k nimž bylo technologické vybavení připevněno. Z pracovního hlediska však byla tato metoda mnohem náročnější. Existuje ještě jedna varianta, která je ovšem velmi nevhodná z konstrukčního hlediska. Ta spočívá ve vyvrtání otvoru přímo do stěny stožáru, vytvoření závitu a následného připevnění technologického vybavení pomocí šroubu. Vyvrtanými otvory jsou však ve stožáru vytvářeny vruby, které snižují jeho pevnost a přispívají také k šíření trhlin a rychlejší únavě materiálu. [14]

4.3.2 Příhradový stožár

Příhradový stožár je u evropských větrných elektráren raritou. Rozšířený je v asijských zemích, především v Číně a Indii. Tento typ stožáru je negativně vnímán z důvodu svého „neatraktivního vzhledu“. Na druhou stranu má příhradový stožár několik výhod oproti tubusovému stožáru. Při jeho výrobě se spotřebuje méně oceli než v případě tubusového stožáru stejné výšky. Díky tomu je možné postavit o 20 % vyšší příhradový stožár než tubusový při stejných finančních nákladech. Celkově je však příhradová konstrukce ve srovnání s tubusovou ekonomicky výhodnější až při výšce stožáru nad 100 m. [1], [9], [10], [12], [13]

Další výhoda příhradového stožáru spočívá v jednodušší přepravě jeho částí na místo výstavby větrné elektrárny, jelikož přepravovaný náklad pro výstavbu příhradového stožáru je tvořen pouze jednotlivými nosíky a vzpěrami. Tento náklad je možné přepravovat běžnými nákladními vozidly, tudíž není potřebná přeprava speciálními nákladními vozidly pro přepravu nadměrných nákladů za asistence doprovodných vozidel. Výhoda jednodušší přepravy je obzvláště přínosná při stavbě větrných elektráren v horských oblastech. [9], [10], [12], [13]

U příhradového stožáru se provádí povrchová úprava pozinkováním v ohni. Tato metoda zaručuje čtyřicetiletou životnost, tudíž se nemusí provádět povrchový nátěr, který je nezbytný na ocelových tubusových stožárech. [9], [10]

Poslední výhodou stožáru příhradové konstrukce je nižší intenzita odrazu světla dopadajícího ze Slunce. [9], [10]

Dále je uváděno ještě několik výhod příhradového stožáru, které už ovšem závisí na úhlu pohledu jednotlivého pozorovatele a jeho estetických preferencích. Řadí se mezi ně například transparentnost, díky které se stožáry této konstrukce při pohledu z větší dálky „ztrácejí“ v krajině a lépe s ní splývají. Je však důležité podotknout, že v tomto případě hraje velmi důležitou roli vzdálenost mezi stožárem a pozorovatelem. Při menší vzdálenosti je totiž příhradový stožár stejně dobře viditelný jako tubusový stožár a navíc je mnohem mohutnější než tubusový stožár. Kromě transparentnosti se řadí mezi tyto výhody ještě vhodnost zasazení příhradového stožáru do určitého rázu krajiny, například lesního prostředí a začlenění do krajiny, kde jsou již vybudovány stožáry elektrického vedení, které jsou rovněž konstrukcí příhradového typu, což má za následek lepší splynutí větrné elektrárny s okolním terénem. [9], [10], [12]

Jedna z mála větrných elektráren v Evropě se stožárem příhradové konstrukce je větrná elektrárna Führländer 2500 (viz Obrázek 8), která je zároveň jednou z nejvyšších větrných elektráren v Evropě. Nachází v Německu, nedaleko obce Laasow. Elektrárna disponuje nominálním výkonem 2,5 MW, její příhradový stožár je vysoký 160 m a celková hmotnost stožáru je 374 tun. Listy rotoru této elektrárny se v nejvyšším bodě nacházejí ve výšce 205 m. Základ stožáru je tvořen čtyřmi betonovými patkami na čtvercovém půdorysu o délce strany 29 m. Jednotlivé díly stožáru byly povrchově upraveny pozinkováním v ohni a na místě výstavby byly spojeny pevnostními šrouby. Montáž stožáru trvala téměř dva měsíce. [12]



Obrázek 8 Větrná elektrárna Führlander 2500 s příhradovým stožárem u obce Laasow v Německu; vedle elektrárny je vidět speciální jeřáb s lomeným ramenem, pomocí kterého byla elektrárna postavena [12]

4.3.3 Prefabrikovaný betonový stožár

Tento relativně nový typ stožáru se rozvíjí zejména na území Evropy. Skládá se z dílců, což jsou betonové skořepiny s vnitřní ocelovou výztuží. Betonové skořepiny jsou vyráběny v lokální betonárce, následně jsou transportovány na místo výstavby větrné elektrárny, kde jsou poté kompletovány do skruží. Podstatnou výhodou je, že velikost vyráběných betonových skořepin lze snadno přizpůsobit přepravním možnostem, tudíž transport na místo výstavby probíhá bez komplikací. To je jeden z důvodů, proč jsou

betonové stožáry oblíbené. Podle přepravních možností může být vyrobena betonová skořepina kruhová, polokruhová nebo čtvrtkruhová. [13], [16]

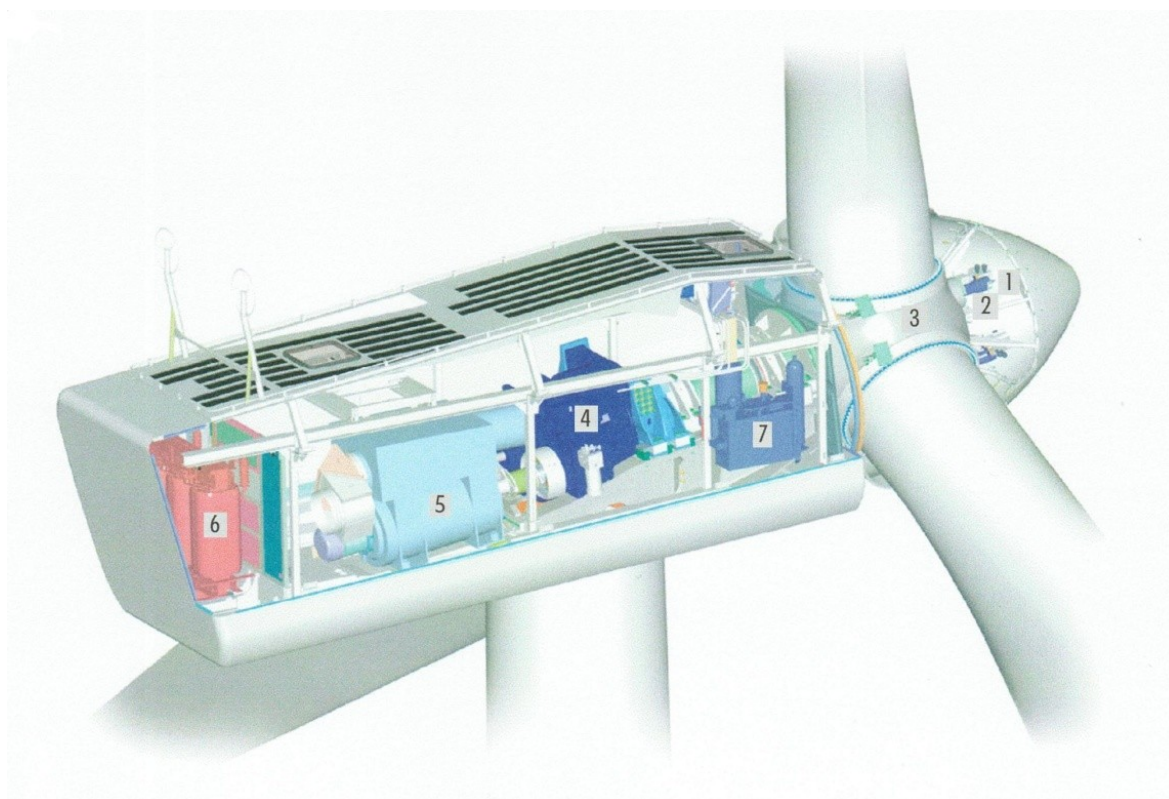
Stožáry betonové konstrukce se staly oblíbenými také z důvodu velmi dlouhé životnosti a zároveň nízkými nároky na opravu v jejím průběhu. Velkým přínosem je rovněž velmi vysoká odolnost proti korozi, což je obzvláště důležitá vlastnost u větrných elektráren instalovaných na pobřeží nebo u off-shore větrných elektráren. V porovnání s ocelovým tubusovým stožárem má stožár betonové konstrukce lepší vlastnosti z hlediska tlumení provozního hluku a vibrací. [16]

Na místě výstavby větrné elektrárny jsou nejprve pomocí menšího jeřábu sestaveny jednotlivé prstence, jejichž vzájemnou propojenost v místech svislých spojů zajišťují ocelové výztuže vyvedené na boční čelo betonové skořepiny. Následně se ze 4 takových prstenců postaví kuželovitá sekce stožáru o výšce přibližně 12 m. Vzájemné propojení prstenců zajišťují předpínací kabely. Poté se velkým jeřábem tato kuželovitá sekce stožáru usadí na finální pozici. Při výstavbě samotného betonového stožáru se současně provádí výstavba 2 protilehlých příčnickových segmentů zajišťujících vertikální stabilitu stožáru. Kromě toho se po této podpůrné konstrukci pohybuje montážní plošina. Každá následující sekce, která je pomocí jeřábu usazena na již postavenou část stožáru, je bezprostředně po usazení propojena dlouhými předepjatými šrouby s předchozí sekcí. V případě tří sekcí postavených na sobě hovoříme o skupině sekcí, která se propojí předpínacími kabely. Následující sekce se může usadit až po dokončení tohoto procesu. Posledním krokem výstavby betonového stožáru je usazení ocelového zakončení na vrchol stožáru, na které následně již přímo dosedá otočné ložisko gondoly. Poté je ještě z důvodu zajištění pevnosti stožáru propojen předepjatými ocelovými lany celý stožár, a to dutinami ve skružích od ocelového zakončení až po patu stožáru. Nakonec se ještě stožár vybaví vnitřními komponenty a na povrchu stožáru se provede ochranný nátěr. [16]

4.4 Gondola větrné elektrárny

Gondola nebo též strojovna je společně s rotorem nejdůležitější částí větrné elektrárny, protože výroba elektrické energie probíhá právě v gondole. Někdy je také označována jako „mozek“ větrné elektrárny. Nachází se zde nejdůležitější komponenty, jako je převodovka, generátor, transformátor, hnací hřídel, brzda, řídicí jednotky, systémy zajišťující natáčení gondoly po větru, hydraulické systémy a další. Systém rozmístění

jednotlivých komponentů v gondole závisí na konkrétním výrobci. Na Obrázku 9 je znázorněn průřez gondolou větrné elektrárny dánské společnosti Vestas (konkrétně se jedná o typ Vestas V90 - 2,0 MW), která patří mezi přední výrobce větrných elektráren s největšími zkušenostmi v oboru. Na střeše gondoly se nacházejí senzory měřící rychlost a směr větru. Gondola je umístěna na vrcholu stožáru větrné elektrárny na velkém otočném ložisku a její hmotnost se pohybuje okolo 70 tun. Kryt gondoly je nejčastěji vyroben z plastu vyztuženého skelným vláknem. Gondola chrání všechny důležité komponenty před deštěm, sněhem, prachem, slunečním zářením a dalšími vlivy. Přístup do gondoly je umožněn ze stožáru centrálně umístěným otvorem. [9], [10], [17], [18], [19]



Obrázek 9 Gondola větrné elektrárny Vestas V90 - 2,0 MW: 1 - řízení listů rotoru, 2 - válec regulace „pitch“, 3 - rotorová hlava, 4 - převodovka, 5 - generátor, 6 - transformátor, 7 - hydraulická jednotka [9]

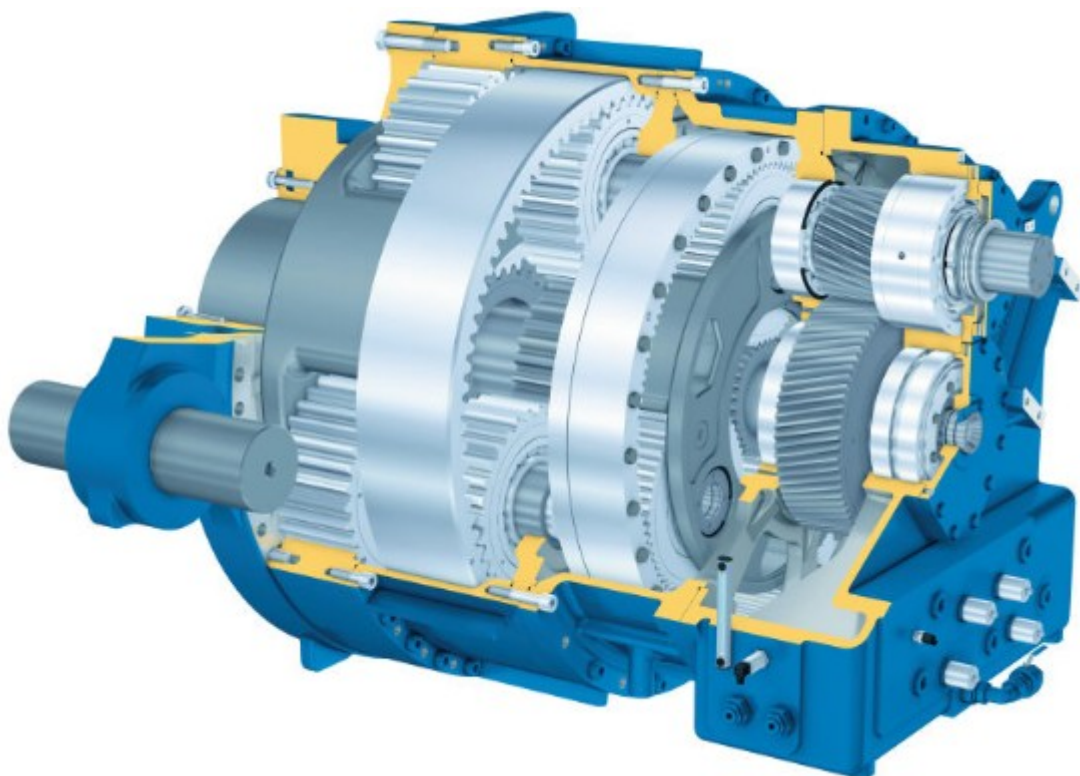
4.4.1 Převodovka

Mechanická převodovka transformuje nízkou rotační rychlost rotoru na podstatně vyšší rotační rychlost konvekčních generátorů. Patří mezi nejvíce namáhané části větrné elektrárny z důvodu velmi nerovnoměrného zatížení od rotoru, které je způsobeno velmi

proměnlivými rychlostmi větru a jeho nárazy. V některých případech mohou tyto nárazy větru způsobit rázy od rotoru několikanásobně převyšující hodnotu standardního provozního zatížení. To je důvodem, proč je při navrhování převodovek pro větrné elektrárny kladen důraz na vysoký bezpečnostní koeficient. Pro zajištění co nejnižšího chodu převodovky během jejího provozu jsou ozubená kola převodovky kalena, cementována a nitridována a povrch zubů je broušen. Je vyžadováno, aby převodovka větrné elektrárny byla schopna provozu v intervalu teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$, v některých případech je tento interval ještě větší. [1], [9], [10], [20]

Podle toho, zda větrná elektrárna využívá k výrobě elektrické energie převodovku či nikoliv, rozlišujeme dva typy větrných elektráren - větrné elektrárny s převodovkou a větrné elektrárny bez převodovky. Obecně nelze říci, který typ je lepší, jelikož oba typy mají své plusy i mínusy. Na mezinárodním trhu jsou však oba typy elektráren oblíbené a dodnes se úspěšně uplatňují. Každý výrobce podle své filozofie preferuje jeden z těchto dvou typů větrných elektráren, přičemž důležitou roli v rozhodování představují tradice značky, vývojové cíle a ekonomická analýza. [9], [10]

Tradiční konstrukce větrných elektráren (větrné elektrárny s převodovkou) je založena na využití hnacího hřídele, ložisek, převodovek a spojek. Tyto strojní součástky jsou z důvodu garance vysoké kvality vyráběny a dodávány specializovanými výrobci. V současné době jsou na výrobu převodovek větrných elektráren kladeny takové požadavky, že hluk vydávající převodovkou při provozu větrné elektrárny je tak nízký, že není důvod z tohoto hlediska vyrábět větrné elektrárny bez převodovky. Převodovky větrných elektráren mají v současnosti životnost dvacet let, navíc se poslední dobou prodloužily intervaly výměny mazacího oleje v převodovce. Výhodou větrných elektráren s převodovkou je rozdělení celého soustrojí převodovky uvnitř gondoly na kompaktní části, což představuje snadnou dopravu na stanoviště i montáž těchto částí, a to i v megawattové třídě. U větrných elektráren megawattové třídy se používá několikastupňová planetová převodovka, případně kombinovaná několikastupňová převodovka, která má první stupně planetové a poslední stupeň či poslední dva stupně má koaxiální (viz Obrázek 10). [1], [9], [10], [20]



Obrázek 10 *Dvoustupňová planetová převodovka větrné elektrárny s výstupním koaxiálním stupněm od firmy Bosch-Rexroth s označením Redulus GPV pro výkon 2 MW [20]*

Větrné elektrárny bez převodovky využívají k výrobě elektrické energie nízkorychlostní multipólové generátory (viz Obrázek 11). Nevýhodou těchto generátorů jsou jejich velké rozměry, které mohou zapříčinit jisté problémy při dopravě na stanoviště, především v megawattové třídě. Naopak výhodou této varianty je podstatně nižší počet strojních částí, například není potřebná rozměrově velká převodovková skříň, odpadají spojovací prvky, je nižší počet rotujících prvků. Bezpřevodkové větrné elektrárny mají rovněž jednodušší gondolu a zejména jejich údržba je jednodušší. Při provozu elektrárny totiž nejsou požadovány hydraulické oleje, a to ani při elektricky řízeném systému natáčení gondoly ani při regulaci výkonu dodávaného rotorem. Někdy je jako nevýhoda větrných elektráren bez převodovky uváděn argument, že výroba speciálních generátorů určené pro tento typ větrných elektráren je finančně nákladnější než výroba klasických generátorů z důvodu, že speciální generátory jsou vyráběny v malých sériích. Zde je však nutné si uvědomit, že se zvyšujícím se výkonem a velikostí větrných elektráren jsou klasické generátory a převodovky vyráběny také malosériově. Z toho důvodu je argument vyšší

ceny bezpřevodovkové varianty větrné elektrárny velice nepravděpodobný. Z předních výrobců větrných elektráren je představitelem technologie bez převodovky německá společnost Enercon. [1], [9], [10]



Obrázek 11 *Prstenec multipólového generátoru větrné elektrárny [21]*

4.4.2 Generátor

Elektrická energie je ve větrných elektrárnách vyráběna generátory. Účelem generátoru je transformovat mechanickou energii na elektrickou. Převod mechanické energie od rotoru (přes převodovku) na generátor zajišťuje hřídel, případně dvě koaxiální hřídele. Mezi převodovkou a generátorem se nachází kompozitní spojka (jejíž velkou předností je, že nevyžaduje údržbu) zajišťující vyrovnávání rázových špiček, které jsou důsledkem náhlých nárazů větru. [7], [10], [17], [22], [23]

V moderních větrných elektrárnách jsou pro výrobu elektrické energie používány dva druhy generátorů - asynchronní a synchronní. Ve většině případů se jedná o generátory trojfázového střídavého proudu. O používaném typu generátoru ve větrných elektrárnách rozhoduje konkrétní výrobce podle toho, jakou si zvolí celkovou koncepci větrné

elektrárny. Obvykle však platí pravidlo, že u větrných elektráren s převodovkou se používá technologie asynchronního generátoru s vinutým rotorem, zatímco u větrných elektráren bez převodovky se používá technologie synchronního generátoru. [7], [17], [23], [24]

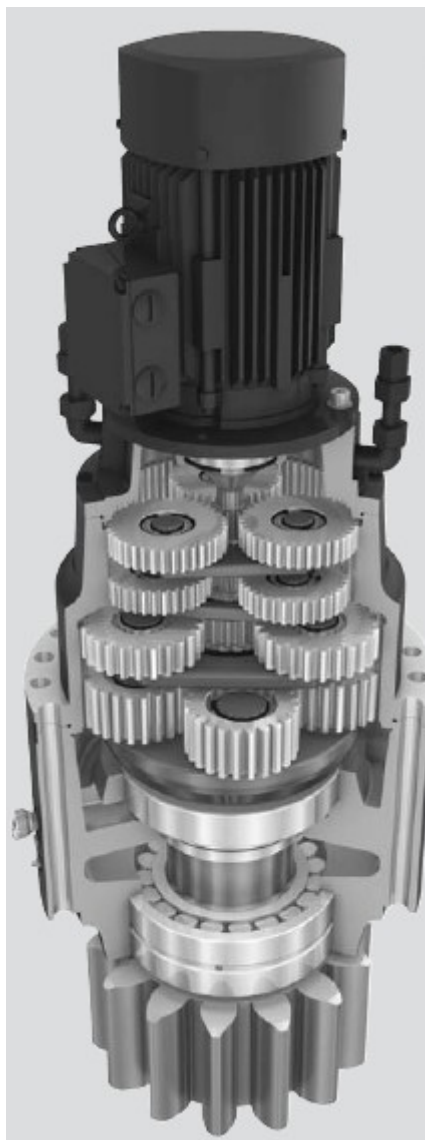
Asynchronní generátor je konstrukčně jednodušší než synchronní, je také ekonomicky výhodnější, vykazuje vyšší provozní spolehlivost a je méně náročný na údržbu. Jeho další přednosti spočívají v jednoduchém rozběhu, připojení na síť a regulaci výkonu. Nevýhodou asynchronního generátoru je malý regulační rozsah jeho otáček, nicméně tuto nevýhodu lze korigovat využitím asynchronního generátoru s napájeným rotorem, označovaného jako *double-fed induction generator*. Ten se používá zejména ve větrných elektrárnách vyšších instalovaných výkonů, jelikož při tomto způsobu zapojení je generátor schopen vyrábět elektrickou energii i při nízkých otáčkách rotoru (to znamená při nízkých rychlostech větru). Generátor však může být při tomto způsobu zapojení v provozu i bez napájení rotoru, a to v případě spojení rotorového vinutí nakrátko nebo v případě zapojení přídavných odporů do rotoru umožňujících zvýšení rozsahu skluzu při provozu generátoru sklonem momentové charakteristiky generátoru. V současných větrných elektrárnách jsou pro výrobu elektrické energie používány čtyřpólové nebo šestipólové asynchronní generátory. Ve spojení s elektrickou sítí o frekvenci 50 Hz mají čtyřpólové generátory otáčky 1500 ot./min. a šestipólové generátory otáčky 1000 ot./min. [7], [23], [24]

Synchronní generátor je schopen provozu jen při synchronních otáčkách rotoru větrné elektrárny. Pro schopnost provozu synchronního generátoru v širším rozsahu otáček je zapotřebí usměrnění vyrobené elektrické energie a poté její převedení na původní frekvenci sítě. Z toho důvodu bývá k synchronnímu generátoru připojen měnič frekvence, který umožňuje regulovat celý jeho výkon. To umožňuje využití širokého rozsahu otáček rotoru. Synchronní generátory se používají ve větrných elektrárnách vysokých instalovaných výkonů nebo specifických provedení. U současných větrných elektráren jsou synchronní generátory (až na několik výjimek) poháněny přímo rotorem větrné elektrárny, tudíž není zapotřebí převodovky. [7], [23]

4.4.3 Systém natáčení strojovny

Z důvodu velké variability směru proudění větru jsou větrné elektrárny pro maximální možné využití potenciálu energie větru vybaveny systémem natáčení strojovny,

respektive gondoly. Data o rychlosti a směru větru naměřená senzory (nacházejících se na střeše gondoly větrné elektrárny) jsou předána řídicí jednotce založené na bázi mikroprocesorů, která si tato data vyhodnotí a na základě toho natáčí gondolu i s rotorem do směru větru tak, aby rovina rotoru byla vždy kolmá ke směru proudění. [1], [10], [17], [19], [25], [26]



Obrázek 12 *Elektropohon natáčení gondoly větrné elektrárny skládající se z elektromotoru s výkonem 2 kW, čtyřstupňové planetové převodovky, výstupního hřídele uloženého ve válečkovém ložisku a pastorku*
[26]

Natáčení gondoly do směru proudění větru zajišťují elektropohony, které se nacházejí na nosném rámu strojovny. V závislosti na pokynech řídicí jednotky mají

elektropohony za úkol natáčet gondolu doprava nebo doleva. Podle velikosti větrné elektrárny se v gondole nachází 2, 4 nebo 6 těchto elektropohonů. Elektropohon (viz Obrázek 12) se skládá z elektromotoru, jehož výkon se pohybuje v rozmezí 2 - 2,5 kW, dále z několikastupňové planetové převodovky a pastorku. Elektromotor přes převodovku otáčí pastorkem, který zasahuje do přímého ozubení velkého otočného ložiska upevněného na vrcholu stožáru větrné elektrárny. Vnitřní klec otočného ložiska je připevněna k nosnému rámu strojovny. [10], [17], [19], [25], [26]

Při natáčení gondoly se současně otáčejícím se rotorem za stále měnícího se směru větru však vzniká gyroskopický moment, jímž vyvolané zatížení nejsou elektropohony schopné kompenzovat. K tomuto účelu se nejčastěji používají čelistové brzdy, které zaaretují danou polohu gondoly po jejím natočení na požadovanou pozici sevřením vnitřních čelistí okolo odpovídajícího vnějšího disku nacházejícího se na vrcholu stožáru. [19], [25], [26]

4.4.4 Hydraulické systémy

Důležitou součástí vybavení strojovny větrné elektrárny jsou hydraulické systémy. Jejich přesný počet se liší v závislosti na zvolené konstrukci jednotlivých komponentů konkrétního výrobce. Na hydraulickém mechanismu může pracovat například parkovací kotoučová brzda nacházející se na vysokorychlostním hřídeli převodu nebo brzda systému natáčení gondoly. V takovém případě se ve strojovně nachází hydraulický „brzdový“ okruh s centrálním blokem a vestavnými ventily a dalšími bloky pro jednotlivé brzdy. [10], [27]

Na hydraulickém mechanismu může být založen také systém nastavování listů rotoru větrné elektrárny (podrobněji bude vysvětleno v podkapitole 4.5). Pokud tomu tak je, nachází se ve strojovně ještě jeden hydraulický okruh, který zajišťuje pouze změnu úhlu nastavení listů rotoru, jelikož tento proces musí být proveden velmi rychle a zároveň citlivě. Systém nastavení listů rotoru je stejně jako systém natáčení gondoly kontrolován a řízen řídicí jednotkou větrné elektrárny. Změna úhlu nastavení listů rotoru bývá aktivována hydraulickým systémem přes momentové rameno. [10], [27]

4.4.5 Transformátor

Transformátor je zařízení sloužící ke změně napětí elektrické energie vyrobené generátorem. Elektrický proud odcházející z generátoru má napětí 400 - 690 V. Větrné

elektrárny bývají připojeny na rozvodnou elektrickou síť s napětím 22 000 nebo 35 000 V. Napětí elektrické energie odcházející z generátoru je tedy nutné převést na hodnotu napětí elektrické rozvodné sítě. Tuto změnu napětí zajišťuje právě transformátor, který z tohoto důvodu představuje důležitou součást větrných elektráren. [10], [17]

Transformátor bývá nejčastěji olejový, dvouvintuřový. Může být umístěn přímo v gondole větrné elektrárny anebo se na zemi vedle stožáru větrné elektrárny nachází kontejnerová betonová trafostanice, přičemž ve většině případů se staví jedna trafostanice pro tři větrné elektrárny. [10]

4.5 Rotor větrné elektrárny

Rotor je konstrukční jednotkou větrných elektráren, na níž závisí výkon odebraný proudícímu vzduchu (dále závisí ještě na meteorologických parametrech a hodnotě součinitele výkonu). Rotory větrných elektráren podléhají nepřetržitému vývoji z hlediska velikosti, aerodynamických parametrů a provozních režimů. Čím větší je průměr rotoru větrné elektrárny, tím větší množství elektrické energie je větrná elektrárna schopna vyrobit. To je důvodem, proč výrobci větrných elektráren vyrábějí stále větší rotory. Nejčastěji instalované současné větrné elektrárny mají rotor o průměru 80 až 100 m, průměr rotoru u největších větrných elektráren však přesahuje 160 m. Jedná se tedy o zásadní část celého zařízení větrné elektrárny. Existují čtyři základní typy rotorů: vrtule, lopatkové kolo, Darrieuův rotor a Savoniův rotor. U větrných elektráren se však jako rotor používají výhradně vrtule (proto v této bakalářské práci pod pojmem rotor je myšlena vrtule). [1], [8], [10], [17]

Rotor neboli vrtule větrné elektrárny se skládá z rotorové hlavy (která je spojena se strojovnou) a rotorových listů. Právě listy rotoru tvoří nejnápadnější část celé větrné elektrárny. Téměř všechny větrné elektrárny jsou vybaveny třílistým rotorem. Velmi vzácně se lze ještě setkat s větrnými elektrárnami vybavenými dvoulistým rotorem. V minulosti se dokonce používaly i jednolisté rotory s protizávažím, s těmi se však již dnes nesetkáme. Třílistý rotor větrné elektrárny je ideální z důvodu aerodynamické a dynamické vyváženosti. Kromě toho má třílistý rotor estetičtější vzhled oproti dvoulistým rotorům. Úkolem listů je roztáčet rotor větrné elektrárny, přičemž tento proces se uskutečňuje díky využívání aerodynamického profilu listů rotoru (stejného aerodynamického principu se využívá u křídel letadla). V případě vysokých rychlostí větru mohou listy naopak regulovat

rychlost otáčení rotoru (podrobnější informace v subkapitole 4.5.4). [1], [10], [17], [28], [29]

Při výrobě rotorů větrných elektráren jsou kladeny vysoké nároky na konstrukci a kvalitu používaných materiálů pro zajištění vysoké provozní spolehlivosti, obzvláště u velkých rotorů. Ty jsou totiž vystaveny značné zátěži, například při regulaci výkonu dodávaného rotorem natočením listů do praporové polohy, dále při malorozměrných turbulencích nebo při velkých vertikálních gradientech rychlosti větru. [10], [29]

4.5.1 Rozdělení rotorů

Rotory větrných elektráren rozdělujeme do několika kategorií podle různých parametrů. Nejdůležitějším parametrem je aerodynamický princip, který rotor při svém provozu využívá. Mezi další důležité parametry patří osa rotace rotoru a rychlostní součinitel. [7], [23]

Podle aerodynamického principu využívaného při provozu rotoru rozlišujeme rotory odporové a vztlkové. Rotory pracující na odporovém principu se dnes již nepoužívají (u větrných elektráren), v minulosti však byly používány například u větrných mlýnů. Odporové rotory při svém provozu nastavenou plochou vytvářely proudícímu větru aerodynamický odpor, čímž na této ploše vznikla síla, která byla následně mechanicky transformována na otáčivý pohyb. Nevýhodou těchto rotorů (a také důvodem, proč se dnes již nepoužívají) je jejich nízká účinnost ve srovnání s rotory pracujícími na vztlkovém principu. Větrné elektrárny bývají vybaveny právě rotory pracujícími na vztlkovém principu. Jejich princip přeměny kinetické energie větru na mechanickou práci spočívá ve zpomalování proudu vzduchu protékajícího jejich pracovní plochou a tímto způsobem je proudícímu vzduchu odebrána část jeho energie. Nejdůležitějším elementem vztlkového rotoru je list, který je v podstatě rotujícím křídlem letadla. Jediný rozdíl spočívá v nastavení profilu listu na rotoru proti větru. Profil listu musí být proti proudícímu větru natočen svou spodní stranou, což je obráceně než je tomu u křídla letadla. V případě správného nastavení profilu listu jej proudící vzduch obtéká způsobem, kdy na horní straně profilu rychlost proudění narůstá a na spodní straně rychlost proudění klesá. [7], [23]

Dále rozdělujeme rotory podle osy, kolem které se otáčejí. V tomto případě rozlišujeme rotory s vertikální osou otáčení a horizontální osou otáčení. Rotory s vertikální

osou otáčení mají listy v malé výšce nad zemí a nejsou závislé na směru proudění větru, tudíž není potřebné je natačovat na směr proudění. Jejich nevýhodou je však nízká účinnost. Větrné elektrárny mají výhradně rotor s horizontální osou otáčení. Tyto rotory jsou natačeny ve směru proudění větru, jejich listy se nacházejí ve vyšší poloze nad zemí a jejich účinnost je vyšší. [8]

Třetím důležitým parametrem určující rozdělení rotorů větrných elektráren je součinitel rychloběžnosti λ , což je bezrozměrné číslo vyjadřující poměr obvodové rychlosti rotoru a rychlosti větru před rotorem. Podle tohoto parametru rozlišujeme rotory pomaloběžné (pro $\lambda < 1,5$), středně rychloběžné (pro $\lambda = 1,5$ až $3,5$) a rychloběžné (pro $\lambda > 3,5$). [8]

4.5.2 Konstrukce a výroba rotorových listů

List rotoru je kompozitová skořepina, která je laminována z mnoha vrstev skelné tkaniny. Pro zvýšení plošné tuhosti se někdy mezi tkaniny vkládá tvrzená pěna. Rotorový list je uvnitř vyztužen nosníkem přenášejícím hlavní zatížení, který kromě skelné tkaniny může být tvořen také kevlarom nebo uhlíkem. Vnitřní konstrukce listu, tedy vrstvení různých druhů tkanin s různou orientací vláken a tvrzených pěn, je z důvodu odlišné pevnosti a směrové orientace této pevnosti jednotlivých vrstev v kompozitové konstrukci určena složitými pevnostními výpočty, které jsou prováděny na velmi výkonném počítači metodou konečných prvků, při které je plocha navrhovaného listu rozdělena na velký počet malých prvků (například jehlany nebo krychličky), u kterých jsou počítačem vypočítány jednotlivé hodnoty napětí a deformace. Tento výpočet může probíhat i několik hodin. Následně je z těchto vypočítaných hodnot vytvořen grafický výstup napěťové a deformační mapy listu rotoru. [30]

Výroba rotorových listů je prováděna metodou laminování, při které prosycováním tkaniny (nejčastěji skelnou) pojivem (nejčastěji epoxidovou pryskyřicí) vzniká kompozitní díl. Pryskyřice je před zpracováním smíchána s tvrdidlem. Po vytvrzení pojiva vzniká kompozit, který kombinuje vlastnosti obou materiálů. V současnosti jsou listy rotory vyráběny metodou laminování do negativní formy, která je vytvořena jako negativ požadovaného tvaru listu. Samotná výroba listu spočívá v pokládání tkanin do předem naseparované formy a následně se pomocí válečku nebo štětce provádí impregnace laminační pryskyřicí. Při tomto procesu je důležité nepřekračovat nezbytně nutné množství

dodávané pryskyřice, protože nadměrné množství pryskyřice by způsobilo zhoršení mechanických vlastností listu. V praxi se jako prevence před nadměrným množstvím dodané pryskyřice používá postup, kdy pracovník obdrží přesně odvážené množství pryskyřice a zároveň má přesně vytyčenou plochu, na kterou je potřebné pryskyřici rovnoměrně nanést. Dalším procesem výroby rotorového listu je vrstvení laminátu, který je však obchodním tajemstvím každého výrobce. Při tomto procesu je vytvořena forma horní i spodní poloviny listu. [31]

Někteří výrobci již používají vylepšenou metodu výroby rotorového listu, při které jsou stejně jako u předchozí metody pokládány tkaniny do naseparované formy, ovšem na poslední vrstvu je přidána ještě odtrhová tkanina sloužící rovněž k přípravě povrchu pro následné lepení konstrukce (po vytvrzení je tato tkanina odstraněna). Na odtrhovou tkaninu se následně položí perforovaná folie vsakující přebytečnou pryskyřici, dále prodyšná tkanina usnadňující odsátí vzduchu ze všech ploch formy a nakonec krycí folie, která je po obvodu formy dokonale utěsněna. Následně přichází na řadu odsátí vzduchu pomocí vývěvy. Zvýšení tlaku a odstranění přebytečné pryskyřice má za následek zmenšení obsahu dutin listu a zejména zlepšení jeho mechanických vlastností. [31]

Hlavní nosník listu se vyrábí odděleně, a to metodou olaminování jádra z tvrzené pěny kombinací skelné, uhlíkové a kevlarové tkaniny. Poté již přichází na řadu celkové sestavení listu. Do spodní poloviny listu je nanesen pás husté epoxidové pryskyřice, do níž je následně usazen nosník. Dále je hustá pryskyřice nanesena na horní plochu nosníku a také na místa styku okrajů horní a spodní poloviny listu (pryskyřice musí být hustá proto, aby z těchto míst nestékala). Na závěr se forma obsahující horní polovinu listu přiklopí na formu obsahující spodní polovinu listu. [31]

4.5.3 Vyhřívání rotorových listů

Během provozu větrné elektrárny v zimním období může nastat situace, kdy se na listech rotoru vytváří námraza. Největší pravděpodobnost vytvoření námrazy je při teplotě pod bodem mrazu, pokud je zároveň vysoká vlhkost vzduchu. Námraza na listech rotoru je potenciální hrozbou pro okolí větrné elektrárny (například pokud se větrné elektrárny nacházejí v blízkosti silnic), protože může dojít k uvolnění této námrazy a následně odlétávají kusy ledu, respektive ledové tříště z listů rotoru do okolí. Největší riziko představuje výskyt námrazy na náběžné straně listů rotoru. V takových případech bývá

větrná elektrárna odstavena z provozu, tím pádem není schopná vyrábět elektrickou energii i přes jinak ideální povětrnostní podmínky pro výrobu elektrické energie z větru. [10], [32]

Aby kvůli námraze na listech rotoru nedocházelo k omezení provozu větrných elektráren a ke snížení množství vyrobené elektrické energie, jsou moderní větrné elektrárny vybaveny systémem vyhřívání listů rotoru. Tento proces je uskutečňován pomocí ventilátoru s topným tělesem. Horký vzduch je foukán do náběžné hrany listu, následně se na vrcholu listu horký vzduch otáčí a proudí odtokovou stranou listu zpět k ventilátoru. Z důvodu energetické náročnosti je výhodné tento systém instalovat pouze do velkých větrných elektráren. [32]

4.5.4 Způsoby regulace výkonu dodávaného rotorem

Konstrukce větrných elektráren je uzpůsobena tomu, aby větrná elektrárna byla schopna vyrábět maximální možné množství elektrické energie při rychlostech větru okolo 15 m/s (v přepočtu 54 km/h). Konstruovat větrné elektrárny s maximem produkce elektrické energie při vyšších rychlostech větru by nebylo výhodné z důvodu sporadických výskytů větrů, které dosahují takových rychlostí. [7]

Větrná elektrárna začíná vyrábět elektrickou energii při rychlosti větru 3 až 5,5 m/s (v závislosti na modelu a výrobci větrné elektrárny). Tato rychlost se nazývá zapínací. Nominálního výkonu dosahuje větrná elektrárna při rychlostech větru 12 až 15 m/s. Při překročení této rychlosti se nominální výkon větrné elektrárny již nezvyšuje a zůstává až do vypínací rychlosti konstantní. Vypínací rychlost má hodnotu 25 m/s, u některých větrných elektráren až 30 m/s. Při dosažení této rychlosti větru je větrná elektrárna odstavena z provozu. [1], [7], [10], [23]

Vyšší rychlosti větru, zejména blíží se vypínací rychlosti, způsobují vysoké otáčky rotoru větrné elektrárny, které však mohou způsobit poškození generátoru. Z toho důvodu je nezbytné od určité rychlosti větru snížit výkon dodávaný rotorem. K tomuto účelu se používají tři následující různé režimy regulace výkonu vrtule (a dvě kombinace těchto režimů):

- regulace „stall“,
- regulace „pitch“,
- regulace „active stall“,

- kombinovaná regulace „stall-pitch“,
- kombinovaná regulace „pitch-stall“. [1], [7], [10]

Regulace „stall“ spočívá v odtržení proudu vzduchu na listech vrtule, přičemž úhel nastavení listů je konstantní. Tento způsob regulace se u moderních větrných elektráren používá jen ojediněle. Listy rotoru jsou v tomto případě pevně ukotveny k rotorové hlavě a regulace probíhá (v případě zvýšení rychlosti větru) změnou tvaru koncových částí listů. Tím dochází ke zvýšení úhlu náběhu na kocích listů a postupnému odtržení proudu vzduchu od listů. V důsledku změny proudění z laminárního na turbulentní se snižuje vztahová síla a zároveň se snižuje točivý moment na hřídeli. Rotory regulované režimem „stall“ mají v porovnání s rotory regulovanými režimem „pitch“ jednodušší konstrukci, jelikož nejsou vybaveny technickým systémem pro změnu nastavení listů rotoru. S tím souvisí skutečnost, že jsou méně náročné na údržbu. Režim „stall“ také vykazuje vysokou spolehlivost regulace výkonu dodávaného rotorem. Nevýhodou regulace režimem „stall“ je pokles výkonu rotoru při vysokých rychlostech větru, tedy v případech, kdy potenciál využitelné energie větru dosahuje maximální hodnoty. Tím pádem dochází i k poklesu produkce elektrické energie. Nevýhodou je také nutnost jemného nastavení listů, které se provádí mnohdy až po zkušebním provozu větrné elektrárny v konkrétní lokalitě. Nevýhodou je rovněž potřeba použití elektrického motoru pro startování rotoru, protože rotor není tohoto úkonu samostatně schopen. Regulaci režimem „stall“ v současnosti nabízejí výrobci u větrných elektráren s nominálním výkonem do 1 MW, u větrných elektráren vyšších výkonů zcela výjimečně. [1], [7], [10]

Regulace „pitch“ je založena na změně úhlu nastavení listů rotoru vůči natékajícímu proudění vzduchu a v současnosti je tento způsob regulace nejpoužívanější. Jedná se o aktivní systém pracující se vstupním signálem o výkonu generátoru. V okamžiku překročení nominálního výkonu generátoru jsou pomocí hydraulického systému listy rotoru vůči natékajícímu proudění vzduchu natočeny pod takovým úhlem, při kterém dochází k poklesu vztahové síly na listech rotoru a snížení využití výkonu rotoru. Při rychlostech větru vyšších než je nominální rychlost je tedy úhel natočení listů rotoru vůči natékajícímu proudění takový, aby otáčky rotoru byly stejné jako právě při nominální rychlosti a bylo tak dosaženo nominálního výkonu. V případě nízkých rychlostí větru je u rotorů regulovaných režimem „pitch“ natočením jejich listů naopak možné zvýšit výkon podle potřeby. Výhody regulace režimem „pitch“ jsou následující:

- aktivní kontrola výkonu v celém spektru rychlosti větru,
- vyšší produkce elektrické energie ve srovnání s regulací režimem „stall“ při identické rychlosti větru,
- snadný start rotoru změnou nastavení úhlu náběhu proudění,
- pro náhlé zastavení rotoru není zapotřebí silných brzd,
- při rychlostech větru překračující nominální rychlost snižuje zatížení listů rotoru,
- při extrémních rychlostech větru, kdy je větrná elektrárna odstavena z provozu, umožňuje natáčení listů rotoru tak, aby jejich zatížení bylo co nejmenší. [1], [7], [10]

Jedinou nevýhodou regulace „pitch“ je podstatně vyšší cena rotorové hlavy (než u regulace „stall“) z důvodu její technické a konstrukční náročnosti, protože musí zajišťovat přenos velké síly působící na listy rotoru a zároveň zaručovat možnost natáčení listu kolem jeho podélné osy. [10]

Třetím způsobem regulace výkonu dodávaného rotorem je regulace režimem „active stall“, který je téměř shodný s režimem „pitch“. Jediný rozdíl je v poslední fázi, kdy pro udržení konstantního výkonu není zvětšován úhel nastavení listů rotoru, ale naopak je zmenšován. V tomto režimu dochází k řízení odtržení proudu na listech, proto „active stall“. Oproti regulaci „pitch“ má regulace „active stall“ výhodu v menší citlivosti na znečištění povrchu (zejména hmyzem) na náběžných hranách listů. [7], [10]

Speciální případ představují extrémní rychlosti větru, při kterých bývá větrná elektrárna odstavena z provozu. Při dosažení vypínací rychlosti, která má pro většinu větrných elektráren hodnotu 25 m/s neboli 90 km/h (pro některé větrné elektrárny až 30 m/s neboli 108 km/h), dochází k nastavení listů rotoru „do praporu“. Tento způsob spočívá v nastavení listů rotoru náběžnou hranou proti směru proudění větru tak, aby proudícímu větru vytvářely co nejmenší odpor a byl tak minimalizován vznik vztlakové síly roztáčející rotor. Tímto způsobem je zároveň sníženo zatížení rotorových listů a celé konstrukce větrné elektrárny, což je velkou předností právě při extrémních rychlostech větru. Větrné elektrárny jsou také vybaveny parkovací kotoučovou brzdou, která je schopna zabrzdit otáčející se rotor za jakýchkoliv povětrnostních podmínek a zároveň zabráňuje nežádoucímu roztočení rotoru při extrémních rychlostech větru. Větrné

elektrárny jsou konstruovány tak, aby stojící větrná elektrárna byla schopna odolávat rychlosti větru 60 m/s neboli 216 km/h. [10], [17], [23]

5 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY V ČESKÉ REPUBLICE A V EVROPĚ

V této kapitole je zaměřena pozornost na novodobý vývoj větrné energetiky a přehled aktuálních informací o větrné energetice na území Evropy a České republiky.

5.1 Větrné elektrárny v Evropě

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2, podnětem pro rozvoj větrné energetiky v Evropě se stala energetická krize (v roce 1973) vyvolána embargem zemí OPEC na vývoz ropy do hospodářsky vyspělých států, v jejímž důsledku bylo nutné hledat jiné možnosti získání energie, zejména z obnovitelných zdrojů. Energie větru byla v té době vnímána jako zajímavá, avšak finančně nákladná a ve větším měřítku nepříliš použitelná varianta. [1]

Koncem 80. let minulého století se však za systematické podpory zejména ze strany Dánska a v menší míře některých dalších evropských států začaly stavět první větrné elektrárny. Technické řešení větrných elektráren se v této době již moc neměnilo, avšak neustálým vývojem se větrné elektrárny stávaly spolehlivějšími, efektivnějšími a také většími. Díky tomuto vývoji došlo k poklesu nákladů na jednotku vyrobené elektrické energie a bylo tak možné smysluplně realizovat výstavbu větrných elektráren i mimo prominentní lokality na mořských pobřežích. [1]

Kromě Dánska se na vývoji větrné energetiky v Evropě významně podílelo také Německo. V polovině 90. let minulého století zde došlo k masivnímu rozvoji výstavby větrných elektráren díky zavedení příznivých a transparentních podmínek pro výkup větrné energie a pro povolování výstavby větrných elektráren. Tento nevídaný rozvoj dosáhl svého vrcholu začátkem 21. století. Touto dobou byla již větrná energetika považována za výhodný způsob bezemisní výroby elektrické energie z vlastních zdrojů. [1]

V první etapě výstavby větrných elektráren v Evropě byla tato zařízení instalována jen na území několika států v čele s Dánskem a Německem, od roku 2000 také Španělskem. Od roku 2005 se výstavba větrných elektráren masivně rozvíjí napříč celou Evropou. [1]

5.1.1 Větrné elektrárny v Evropě v roce 2018

Instalovaný výkon nově postavených větrných elektráren na území Evropy v roce 2018 je 11,7 GW (za toho 10,1 GW na území členských států Evropské unie), z toho

9,0 GW jsou větrné elektrárny na pevnině (on-shore) a 2,7 GW jsou větrné elektrárny na moři (off-shore). V porovnání s rokem 2017, který byl z hlediska nově instalovaného výkonu větrných elektráren v Evropě rekordním (17,1 GW), se jedná o 32% pokles. Zároveň bylo vyřazeno z provozu 0,4 GW instalovaného výkonu větrných elektráren, čistý roční přírůstek evropského instalovaného výkonu v roce 2018 je tedy 11,3 GW. [33], [34]

Celkový instalovaný výkon větrných elektráren v Evropě ke dni 31. 12. 2018 je 189,229 GW (z toho 178,826 GW je instalováno v členských státech Evropské unie), z čehož přibližně 170,8 GW je instalováno na pevnině (on-shore) a přibližně 18,5 GW je instalováno na moři (off-shore). [33], [34] V Tabulce 2 je uveden detailní přehled nově instalovaného výkonu větrných elektráren, výkonu větrných elektráren vyřazených z provozu a celkově instalovaného výkonu větrných elektráren v roce 2018 v členských státech Evropské unie. Jednotlivé státy jsou v tabulce seřazeny podle celkového instalovaného výkonu ke dni 31. 12. 2018 od nejvyššího po nejnižší.

Tabulka 2 Přehled nově instalovaného výkonu větrných elektráren, instalovaného výkonu větrných elektráren vyřazených z provozu a celkového instalovaného výkonu větrných elektráren v členských státech Evropské unie v roce 2018 [33]

Stát Evropské unie	Nově instalovaný výkon v roce 2018 (MW)	Výkon větrných elektráren vyřazených z provozu v roce 2018 (MW)	Celkový instalovaný výkon ke dni 31. 12. 2018 (MW)
Německo	3 371	249	59 311
Španělsko	397	-	23 494
Velká Británie	1 901	-	20 970
Francie	1 565	13	15 309
Itálie	452	-	9 958
Švédsko	720	13	7 407
Polsko	16	-	5 864
Dánsko	281	13	5 758
Portugalsko	67	14	5 380
Nizozemsko	166	72	4 471

Stát Evropské unie	Nově instalovaný výkon v roce 2018 (MW)	Výkon větrných elektráren vyřazených z provozu v roce 2018 (MW)	Celkový instalovaný výkon ke dni 31. 12. 2018 (MW)
Irsko	193	-	3 564
Belgie	513	-	3 360
Rakousko	230	29	3 045
Rumunsko	-	-	3 029
Řecko	207	15	2 844
Finsko	-	3	2 041
Bulharsko	-	-	691
Chorvatsko	-	-	583
Litva	18	-	439
Maďarsko	-	-	329
Česká republika	12	-	320
Estonsko	-	-	310
Kypr	-	-	158
Lucembursko	-	-	120
Lotyšsko	-	-	66
Slovensko	-	-	3
Slovinsko	-	-	3
Malta	-	-	-

Nejvyšší výkon větrných elektráren (3 371 MW) byl v roce 2018 nainstalován v Německu, jehož hodnota tvoří 29% podíl celoevropského nově instalovaného výkonu v roce 2018. Ve srovnání s rokem 2017 však instalovaný výkon větrných elektráren v Německu zaznamenal pokles o 49 %. Německo je zároveň zemí se suverénně nejvyšším

instalovaným výkonem větrné energie v Evropě (59 311 MW). Kromě Německa ještě tři další evropské státy disponují instalovaným výkonem větrných elektráren vyšším než 10 GW. Mezi tyto státy patří Španělsko (23 494 MW), Velká Británie (20 970 MW) a Francie (15 309 MW). Překonání hranice instalovaného výkonu 10 GW má na dosah Itálie (9 958 MW). [33]

Všechny evropské větrné elektrárny dohromady vyrobily v roce 2018 celkem 362 TWh elektrické energie (pro představu tato hodnota odpovídá roční produkci přibližně 23 temelínských jaderných elektráren), pokryly tedy téměř 14 % celkové evropské spotřeby elektrické energie v roce 2018, což je nárůst oproti 12% pokrytí v roce 2017. Zemí s nejvyšším podílem větrné energie na celkové vyrobené elektrické energii je Dánsko, až 41 % celkové vyrobené elektrické energie pochází právě z větrných elektráren. Dalšími státy s nejvyšším podílem větrné energie na celkové výrobě je Irsko (28 %), Portugalsko (24 %), Německo (21 %) a Španělsko (19 %). [33], [34]

5.2 Větrné elektrárny v České republice

V České republice probíhal novodobý vývoj větrné energetiky ve dvou etapách. První etapa tohoto vývoje se odehrávala od roku 1990 do roku 1995. Během tohoto období bylo na území České republiky instalováno 24 větrných elektráren, jejichž celkový nominální výkon měl hodnotu 8,22 MW. Na tu dobu se jednalo o významný rozvoj větrné energetiky, jehož motivací byla inspirace mnoha českých turistů (po otevření hranic) rozsáhlou výstavbou větrných elektráren v Dánsku a v Německu, dále nižší cena větrných elektráren vyráběných na území České republiky (přibližně o 30 %) v porovnání s větrnými elektrárnami vyráběnými v zahraničí a také předpoklad podobné výkupní ceny elektrické energie z větru jako v Dánsku a v Německu. [1]

V roce 1996 se rozvoj větrné energetiky zastavil, což bylo způsobeno následujícími důvody:

- výkupní cena elektřiny pocházející z větrných elektráren s pohybovala v rozmezí 900 až 1130 Kč/MWh, při této výkupní ceně nebylo možné provozovat větrné elektrárny se ziskem,
- větrné elektrárny vyráběné českými výrobci neprošly provozními zkouškami a často se u nich vyskytovaly technické závady,

- rozvíjející se obor neměl potřebné teoretické, odborné a legislativní zázemí, například řada větrných elektráren byla postavena v lokalitách, které byly nevhodné z hlediska větrných podmínek. [1]

Tyto důvody měly za následek totální propad renomé nově se rozvíjejícího energetického oboru a u řady neprosperujících větrných elektráren byla v období 1996 - 2002 provedena jejich demontáž. [1]

Podnětem pro druhou etapu rozvoje větrné energetiky bylo cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu, který pro rok 2002, následně i pro rok 2003, stanovil minimální výkupní cenu elektřiny vyrobené z větru na částku 3 000 Kč/MWh. V následujících letech docházelo k postupnému poklesu této ceny, v roce 2009 činila 2 340 Kč/MWh, ovšem i při této výkupní ceně bylo možné realizovat ziskové projekty výstavby větrných elektráren. Od té doby dochází k pozvolnému zvyšování instalovaného výkonu větrných elektráren v České republice. [1]

5.2.1 Vývoj instalovaného výkonu větrných elektráren v České republice

Vývoj instalovaného výkonu větrných elektráren a výroby elektrické energie z větru v České republice ukazuje Tabulka 3.

Tabulka 3 *Vývoj instalovaného výkonu větrných elektráren a výroby elektrické energie z větru v České republice v období 2004 - 2018 [35]*

Rok	Instalovaný výkon (MW)	Výroba elektrické energie z větru (GWh)
2004	17	8,3
2005	28	21,3
2006	54	49,4
2007	116	125
2008	148	245
2009	192	290
2010	215	336
2011	217	397
2012	260	416

Rok	Instalovaný výkon (MW)	Výroba elektrické energie z větru (GWh)
2013	269	479
2014	283	472,4
2015	283	573
2016	283	496,9
2017	308	591
2018	320	609,3

V roce 2018 bylo v České republice postaveno šest větrných elektráren s instalovaným výkonem 12 MW. Celkový instalovaný výkon větrných elektráren v České republice ke dni 31. 12. 2018 dosahuje hodnoty 320 MW. V porovnání s evropskými státy se jedná o podprůměrný výkon. Jako příklad můžeme uvést Rakousko, které disponuje podobným větrným potenciálem jako Česká republika (i podobnou hustotou zalidnění), kde celkový instalovaný výkon větrných elektráren ke dni 31. 12. 2018 má hodnotu 3 045 MW. Podobné je to i s podílem větrné energie v síti, kdy v České republice pokrývá větrná energie přibližně 1 % celkové spotřeby elektrické energie, v Rakousku je to desetinásobně více. Větrné elektrárny v České republice nemají žádnou ekonomickou ani politickou podporu, což je důvodem jejich nízkého instalovaného výkonu v České republice i přes jejich vysokou efektivitu. [34], [35]

5.2.2 Rozmístění větrných elektráren v České republice podle krajů

Větrné elektrárny jsou na území České republiky rozmístěny velmi nerovnoměrně, což je mimo jiné způsobeno velmi rozdílným větrným potenciálem v jednotlivých oblastech. V Tabulce 4 je uveden přehled celkového instalovaného výkonu větrných elektráren v jednotlivých krajích České republiky (kraje jsou v Tabulce 4 seřazeny podle instalovaného výkonu od nejvyššího k nejnižšímu). Nejvyšší instalovaný výkon větrných elektráren v České republice je v Ústeckém kraji (86,8 MW), naopak v Jihočeském kraji se nenachází žádná větrná elektrárna a instalovaný výkon v tomto kraji je tudíž nulový [35].

Tabulka 4 *Instalovaný výkon větrných elektráren v jednotlivých krajích České republiky ke dni 31. 12. 2018 [35]*

Kraj České republiky	Instalovaný výkon větrných elektráren (MW)
Ústecký	86,8
Karlovarský	53,3
Liberecký	50,0
Olomoucký	45,2
Moravskoslezský	28,2
Pardubický	19,2
Vysočina	11,8
Královéhradecký	10,0
Jihomoravský	8,25
Středočeský + Hlavní město Praha	6,0
Plzeňský	0,8
Zlínský	0,225
Jihočeský	0

5.2.3 Výrobci větrných elektráren v České republice

Většina větrných elektráren postavených v České republice pochází od zahraničních výrobců. Nejvíce větrných elektráren instalovaných v České republice pochází od dánské firmy Vestas, která patří mezi přední výrobce větrných elektráren v celosvětovém měřítku. Větrné elektrárny vyrobené touto firmou zaujímají téměř 35% podíl větrných elektráren instalovaných v České republice a jejich celkový výkon je 111,2 MW [35]. Vysoký podíl instalovaných větrných elektráren v České republice mají také dvě německé firmy (rovněž významní výrobci v celosvětovém měřítku) Enercon (výkon 81,9 MW a přibližně 25% podíl) a Senvion (62,7 MW a přibližně 19% podíl) [35]. Detailní přehled výrobců větrných elektráren instalovaných v České republice včetně jejich celkového výkonu poskytuje Tabulka 5.

**Tabulka 5 Přehled instalovaného výkonu větrných elektráren v České republice podle výrobců ke dni
31. 12. 2018 [35]**

Výrobce	Instalovaný výkon v České republice (MW)
Vestas	111,2
Enercon	81,9
Senvion	62,7
DeWind	17,0
Siemens	13,8
Nordex	12,8
WinWind	6,0
Tacke	5,6
Wikov	5,5
GE	1,5
Führlander	1,3
Bonus	0,6
Vítkovice	0,3
WinWorld	0,2

6 VLIVY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Při posuzování vlivů větrných elektráren, respektive větrné energetiky na životní prostředí je zaměřena pozornost především na tato kritéria:

- hluk,
- vlivy na krajinný ráz,
- vlivy na tahové cesty a hnízdění ptáků, vlivy na faunu, flóru a ekosystémy,
- stroboskopický efekt,
- vlivy na půdu a povrchové a podzemní vody,
- ostatní vlivy. [9], [36], [37]

6.1 Hluk

Větrná elektrárna při svém provozu produkuje dva druhy hluku - mechanický a aerodynamický. [9], [36]

Mechanický hluk je produkován jednotlivými komponenty tvořícími výbavu strojovny větrné elektrárny, například generátorem (včetně ventilátoru), převodovkou, natáčecími mechanismy, eventuálně i brzdou. Hladina mechanického hluku emitovaná do okolí větrné elektrárny závisí na kvalitě provedení jednotlivých komponentů i větrné elektrárny jako celku, a rovněž na uložení a kapotáži celého soustrojí. Větrné elektrárny stejně jako všechna ostatní technická zařízení procházejí neustálým vývojem a zdokonalováním, proto u současných sériově vyráběných větrných elektráren je již mechanický hluk téměř eliminován. [9], [36]

Aerodynamický hluk je způsoben obtékáním povrchové plochy listů rotoru proudícím vzduchem a následným uvolňováním vzdušných vírů za hranou listů. Frekvenční spektrum aerodynamického hluku je velmi vyrovnané a se vrůstající frekvencí klesá. Díky neustálému vývoji a technickému zdokonalování větrných elektráren dochází i u aerodynamického hluku ke snižování jeho hladiny (i když zatím v menší míře než u mechanického hluku), čehož je dosahováno zejména modernějšími konstrukcemi listů. [9], [36]

Obecně je šíření hluku od bodového zdroje závislé na směru a rychlosti proudění větru, dále na intenzitě vertikálního promíchávání vzduchu, na tvaru zemského povrchu a

na výskytu překážek. Se zvyšující se vzdáleností od bodového zdroje hladina produkovaného hluku logaritmicky klesá. [9], [36]

Síla vjemu vyvolaného určitým hlukem je významně ovlivňována poměrem mezi jeho intenzitou a intenzitou ostatních hluků, označovaných jako hluk pozadí. Při vazkém a turbulentním tření vzduchu o drsný zemský povrch dochází, zejména v horských oblastech, ke vzniku hluku vysoké hladiny. To je důvod, proč například při vichřici je lidská řeč nesrozumitelná. Pro představu lze uvést výsledky experimentálního měření hluku pozadí, které bylo provedeno na zkušebním polygonu Dlouhá Louka v Krušných horách. Měřením bylo zjištěno, že při rychlosti větru do 5 m/s dosahovala hladina hluku pozadí hodnot od 30 do 40 dB, při rychlosti větru okolo 6 m/s již došlo k nárůstu této hladiny na hodnoty od 33 do 47 dB a při rychlosti větru překračující 8 m/s hladina hluku pozadí již přesahovala hodnotu 45 dB. [9], [36]

Nejvyšší přípustnou hladinu akustického hluku ve venkovním prostoru stanovuje Nařízení vlády č. 148/2006 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Pro denní dobu, respektive v době od 6:00 do 22:00 hodin, má nejvyšší přípustná hladina akustického hluku ve venkovním prostoru hodnotu 50 dB, pro noční dobu (od 22:00 do 6:00 hodin) má hodnotu 40 dB. Toto nařízení ovšem nezohledňuje okolnost, kdy hluk produkovaný větrnou elektrárnou je převyšován hlukem pozadí. [9], [36]

Samotné hodnocení akustické situace se provádí pomocí hlukových studií, které jsou založeny na měření hluku u nejbližší obytné zástavby od větrné elektrárny a následném vyhodnocení naměřených výsledků. Při překročení nejvyšší přípustné hladiny akustického hluku je nutné omezit výkon větrné elektrárny, případně může být v noční době větrná elektrárna i vypnuta. V takovém případě však větrná elektrárna nevyrábí elektrickou energii, z toho důvodu je při navrhování výstavby větrných elektráren kladen důraz na dodržení doporučené vzdálenosti větrných elektráren od nejbližší okolní zástavby. Pro představu, v Německu je uplatňována doporučená vzdálenost větrné elektrárny 300 m od solitérního domu a více než 500 m od okraje skupiny domů (například obce). Ze zkušeností autora [9], [36] ovšem plyne, že minimální vzdálenost větrných elektráren od obytné zástavby by měla být 600 až 700 m. [9], [36], [37]

6.2 Vlivy na krajinný ráz

Pojem krajinný ráz je definován v zákoně č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny. „Krajinný ráz, kterým je zejména přírodní, kulturní a historická charakteristika určitého místa či oblasti, je chráněn před činností snižující jeho estetickou a přírodní hodnotu. Zásahy do krajinného rázu, zejména umísťování a povolování staveb, mohou být prováděny pouze s ohledem na zachování významných krajinných prvků, zvláště chráněných území, kulturních dominant krajiny, harmonické měřítko a vztahy v krajině.“ [38]

Větrné elektrárny významným způsobem mění podobu krajinného rázu. Pro zajištění ochrany krajinného rázu je nutné dodržet požadavek, aby navrhovaná větrná elektrárna nebyla postavena na území přírodního parku. Ten ze zákona patří mezi nejcitlivější území v ochraně krajinného rázu, a proto by se na jeho území výstavba větrné elektrárny neměla uskutečnit. Přírodní parky představují krajinu zahrnující významné estetické a přírodní hodnoty. V zájmu zachování této krajiny byly právě přírodní parky zřízeny. Předmětem ochrany přírodních parků je tedy výhradně ochrana krajinného rázu. [9], [36], [37]

Hodnocení dopadu větrných elektráren na krajinný ráz je nejkontroverznější otázkou z hlediska jejich vlivů na životní prostředí. V tomto případě totiž hraje podstatnou roli estetické vnímání jednotlivého pozorovatele a také jeho osobní vztah k větrné energetice. Příznivci větrných elektráren argumentují tím, že větrné elektrárny mají pozitivní vliv na krajinný ráz z důvodu jejich moderního designu (díky kterému mohou „ozdobit“ krajinu o nový dynamický prvek), technické dokonalosti a také z důvodu, že větrné elektrárny jsou symbolem moderní společnosti ohleduplné k přírodě. Odpůrci větrných elektráren naopak označují větrné elektrárny za monstra hyzdící krajinu. [28]

Při posuzování vlivu větrných elektráren na krajinný ráz bývá obvykle počítačovou animací zpracovávána jejich fotovizualizace, při níž jsou využívány fotografie stávající krajiny (viz Obrázek 13). Prostor krajinného rázu, ve kterém jsou posuzovány stavby větrných elektráren (jinými slovy plochy, z nichž mohou být větrné elektrárny potenciálně viditelné), je velmi rozlehlý. [9], [36], [37]



Obrázek 13 *Pohled na fotovizualizované větrné elektrárny [9]*

Vztah obyvatel k větrné energii, respektive k větrným elektrárnám, byl zkoumán na základě mnoha provedených studií. Tyto studie byly zaměřeny především na postoj obyvatel k větrným elektrárnám před jejich výstavbou a následně po dokončení výstavby, kdy větrné elektrárny již byly v plném provozu. Výsledky těchto studií přinesly zajímavé zjištění. Postoj obyvatel k větrným elektrárnám byl značně negativní v době před její výstavbou (ve fázi plánování výstavby), jehož důvodem byly obavy týkající se narušení krajinného rázu a různých dalších vlivů (například hluk). Po dokončení výstavby a následném uvedení větrných elektráren do plného provozu bylo pozorováno výrazné zlepšení postoje obyvatel k těmto větrným elektrárnám, ke kterému došlo z důvodu, že jejich původní obavy nebyly naplněny. Zároveň po dokončení výstavby získaly větrné elektrárny od dotazovaných obyvatel výrazně pozitivnější hodnocení z estetického hlediska. [28]

Poměrně často je společností řešena otázka, jestli by větrné elektrárny dokázaly vyrobit stejné množství energie, pokud by došlo ke snížení výšky jejich stožárů a ke zmenšení průměru jejich rotorů, neboť by se tímto způsobem snížil jejich vliv na krajinný ráz. [9], [36], [37] Odpověď autora bakalářské práce je jednoznačná - nedokázaly. V podkapitole 4.3 a v podkapitole 4.5 autor bakalářské práce popisuje závislost výšky stožáru a průměru rotoru větrné elektrárny na jejím výkonu, který přímo souvisí s množstvím elektrické energie, kterou je elektrárna schopna vyrobit. Ve zkratce autor bakalářské práce připomíná, že čím vyšší je stožár větrné elektrárny a čím vyšší je průměr jejího rotoru, tím větší množství elektrické energie je elektrárna schopna vyrobit.

Odpovědí na tuto otázku společnosti se zabýval i autor zdrojů [9], [36], [37], který tuto problematiku detailně analyzoval. Výsledkem jeho analýzy je, že pokud by výška stožáru větrné elektrárny (s průměrem rotoru 90 m) byla snížena ze 100 m na 70 m (při rychlostech větru 6,5 m/s a 8,5 m/s), množství vyrobené elektrické energie by kleslo ze 100 % na 45 %. V případě, že by byl snížen průměr rotoru větrné elektrárny z 90 m na 50 m, množství vyrobené elektrické energie by pokleslo na 31 % (při výšce stožáru 100 m), respektive 14 % (při výšce stožáru 70 m).

Snížení výšky stožáru a zmenšení průměru rotoru větrné elektrárny by tedy znamenalo výrazný pokles produkce elektrické energie, přičemž by bylo nutné postavit téměř identickou konstrukci, která by vyžadovala stejný zábor půdy pro vybudování základu, stejné přístupové komunikace a stejnou energetickou infrastrukturu jako elektrárna s vyšším stožárem a větším průměrem rotoru. Navíc vizuální efekt menší větrné elektrárny by pro pozorovatele zůstal téměř stejný, menší větrná elektrárna by v něm pouze vyvolala pocit, že je umístěna ve větší vzdálenosti. [9], [36], [37]

6.3 Vliv na tahové cesty a hnízdění ptáků, vliv na faunu, flóru a ekosystémy

Rozsáhlý výzkum vlivu větrných elektráren na avifaunu provedený v Nizozemsku prokazuje jejich zanedbatelný negativní vliv na ptactvo. Při tomto výzkumu bylo dlouhodobě pozorováno 87 000 ptáků v blízkosti větrných elektráren, kteří v jejich okolí hnízdili, případně do blízkého okolí větrných elektráren přilétali kvůli potravě. Při tomto pozorování byla zaměřena pozornost zejména na způsob letu ptáků v těsné blízkosti větrných elektráren. Bylo zjištěno, že 97 % pozorovaných ptáků se při svém letu větrným

elektrárnám zcela vyhýbalo, pouze u 3 % pozorovaných ptáků jejich dráha letu protínala rovinu otáčejícího se rotoru, přičemž v drtivé většině nedošlo ke kolizi ptáků s otáčejícími se listy rotoru. Je nutné podotknout, že v případě, kdy ke kolizi ptáka s otáčejícími se listy rotoru přece jen dojde, nemusí mít tato kolize za následek smrt ptáka ani jeho těžké zranění. Navíc, za určitou prevenci v tomto ohledu je možné považovat skutečnost, že v případě otáčejícího se rotoru jsou jeho listy „obklopeny“ tlakovým polem vytvářejícím bariéru, která na ptáky funguje jako odpuzovač. [9], [36], [37]

Výzkum zaměřený na chování ptáků v blízkosti větrných elektráren byl proveden i na území České republiky. Prováděn byl v letech 1993 a 1994 v Krušných horách, konkrétně nedaleko obce Dlouhá Louka. Výzkum byl založen na podrobném pozorování hnízdících společenstev ptáků před a po výstavbě větrné elektrárny ve třech nejdůležitějších biotopech - v lese, na louce a v chatové oblasti. Výsledky tohoto výzkumu (podobně jako výsledky výzkumu provedeného v Nizozemsku) prokázaly, že provoz větrných elektráren neměl významný vliv na chování ptáků hnízdících v jejich blízkém okolí. [9], [36], [37]

Na základě výsledků podrobných výzkumů vyplývá, že větrné elektrárny z hlediska úmrtnosti ptáků (případně jejich těžkého zranění) nepředstavují vyšší potenciální riziko než podobné typy staveb (například stožáry elektrického vedení včetně elektrických vodičů, vysoké věže) nebo například silniční či železniční doprava. Větrné elektrárny nepředstavují riziko ani z hlediska možného zhoršení stavu území navrženého pro jejich stavbu, neboť použitím vhodných technických řešení lze tomuto procesu předejít. [9], [36], [37]

Při navrhování výstavby větrných elektráren je však vhodné brát v úvahu požadavek, aby větrné elektrárny byly postaveny mimo lokality představující významné tahové cesty a hnízdění ptáků. K ověření této skutečnosti bývají zpracovávány studie, které zhodnotí vliv navrhovaných větrných elektráren nejen na ptáky, ale i další obratlovce. V praxi bývají stavby větrných elektráren realizovány mimo skladebné části územního systému ekologické stability a mimo území s vyšším stupněm ekologické stability. [9], [36], [37]

Větrné elektrárny mají zanedbatelný vliv také na zvláště chráněná území a biotopy zvláště chráněných druhů živočichů. Aby se případným nepříznivým vlivům na flóru a faunu mohlo předejít, je vhodné za tímto účelem zpracovat floristické a faunistické hodnocení dotčených lokalit. [9], [36], [37]

6.4 Stroboskopický efekt

„Stroboskopický jev je děj, kdy otáčející se předměty osvětlované periodicky proměnným světlem se zdánlivě nepohybují. V případě provozu větrných elektráren se však jedná spíše o možný efekt světelných záblesků a zastiňování pohyblivým stínem ze slunečního svitu.“ [37]

Světelné záblesky mohou představovat riziko pro senzitivní osoby nacházející se v blízkosti větrné elektrárny, u nichž mohou tyto světelné záblesky vyvolat tzv. fotosenzitivní epilepsii. Je však nutné zdůraznit, že frekvence záblesků, která představuje potenciální riziko vyvolání fotosenzitivní epilepsie u zmíněných osob, se pohybuje v intervalu od 5 do 30 Hz. U současně provozovaných větrných elektráren se provozní otáčky rotoru pohybují od 8 do 17 ot./min. Při těchto otáčkách rotoru je však frekvence potenciálních světelných záblesků na úrovni 0,4 až 0,9 Hz. Porovnání těchto hodnot vede k závěru, že tyto dva intervaly frekvence záblesků jsou od sebe „bezpečně vzdáleny“, aby nedocházelo k jejich průniku, který by měl za následek vyvolání fotosenzitivní epilepsie u citlivých osob. [9], [36], [37]

Na eliminaci efektu světelných záblesků se dnes významným způsobem podílejí samotní výrobci větrných elektráren, kteří za tímto účelem provádějí matný povrchový nátěr listů rotoru, například šedou barvou. [9], [36], [37]

Zastiňování pohyblivým stínem je při otáčejícím se rotoru větrné elektrárny a optimálních světelných podmínkách pozorováno ve vzdálenostech do 300 m od větrné elektrárny. Při větších vzdálenostech je tento efekt již prakticky zanedbatelný. Vzhledem ke skutečnosti, že větrné elektrárny jsou stavěny ve vzdálenosti nad 500 m od nejbližší obytné zástavby, lze tento efekt považovat za bezpředmětný. [9], [36], [37]

6.5 Vlivy na půdu a povrchové a podzemní vody

Jedna větrná elektrárna průměrně vyžaduje zábor zemědělského půdního fondu 0,10 až 0,13 hektarů, přičemž vlastní zastavěná plocha pro samotnou elektrárnu má hodnotu přibližně 256 m². Je snahou větrné elektrárny stavět (v rámci možností) na půdách vyznačujících se nízkou produkční schopností a minimální ochranou. Po ukončení provozu větrných elektráren a jejich následné demontáži je většinou prováděna rekultivace

pozemků, na nichž větrné elektrárny původně stály, zpevněné příjezdy jsou často následně využívány pro vjezdy na pozemky z přilehlých komunikací. [9], [36], [37]

Velká výhoda větrných elektráren spočívá ve skutečnosti, že při jejich provozu nevznikají technologické ani splaškové odpadní vody. V případě dešťové vody pocházející ze zpevněných ploch příjezdů je zajištěno její odvádění (založené na gravitačním principu) do okolí a do příkopů. [9], [36], [37]

V průběhu výstavby větrných elektráren je nutné omezit znečištění a vnos zemin do koryt vodotečí na minimum. Zároveň je vždy nezbytné zajistit, aby v rámci výstavby obslužných komunikací a vlastních zařízení větrných elektráren nedošlo ke změně, případně zhoršení odtokových poměrů a výskytu erozních jevů. Pokud je při realizaci výstavby zajištěno dodržení těchto protihavarijních opatření, nemají větrné elektrárny žádný negativní vliv na kvalitu, výšku hladiny a směry proudění podzemních a povrchových vod, a to jak při jejich výstavbě, tak při jejich následném provozu. [9], [36], [37]

6.6 Ostatní vlivy

V zimním období představuje potenciální riziko pro okolí větrné elektrárny možný vznik námrazy na listech rotoru, ze kterých mohou následně do okolí odlétávat kusy ledu, respektive ledové tříště [9], [36], [37]. Tato problematika byla popsána i s řešením v subkapitole 4.5.3, kde byl popsán systém vyhřívání listů rotoru. U současně vyráběných větrných elektráren je tento vliv bezpředmětný, jelikož moderní větrné elektrárny jsou vybaveny již zmíněným systémem vyhřívání listů rotoru.

Další možností řešení tohoto problému je výroba rotorových listů z materiálů zabráňujících ulpívání ledu na listech rotoru. [9], [36], [37]

Přibližně ve vzdálenosti 250 m od větrných elektráren bývají u cest jako prevence instalovány výstražné tabule upozorňující na možné nebezpečí úrazu odlétajícím ledem z listů rotoru. [9], [36], [37]

7 MOŽNÉ SCÉNÁŘE ROZVOJE VĚTRNÉ ENERGETIKY NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY

Budoucí vývoj větrné energetiky na území České republiky nelze s jistotou predikovat. Na jedné straně výstavbě větrných elektráren nahrávají relativně příznivé větrné podmínky mnoha regionů v České republice, na straně druhé jejich dynamickému rozvoji brání zdlouhavé a komplikované schvalovací procesy a rovněž nejednotný postoj veřejné správy. [1]

V současné době představuje problém rozvoje větrné energetiky na území České republiky také velmi nízká zelená dotace. Přesto lze v blízké budoucnosti očekávat rozvoj větrné energetiky a výstavbu nových větrných elektráren na území České republiky, kterému nahrává skutečnost, že do roku 2025 musí 25 % vyrobené elektrické energie pocházet z obnovitelných zdrojů. V současnosti totiž mají obnovitelné zdroje v České republice podíl jen 13,9 % na celkově vyrobené elektrické energii. Pokud tedy má být dosaženo požadavku 25% podílu obnovitelných zdrojů na vyrobené elektrické energii, je nutné investovat do jejich rozvoje. [39]

Kromě větrné energie v podstatě není možné 25% podíl naplnit jinými obnovitelnými zdroji. O výstavbu a provozování vodních elektráren není příliš velký zájem, v případě biomasy představuje zásadní problém nedávné napadení stromů kůrovcem. Rozvoj větrné energetiky tím pádem představuje snadnou cestu k dosažení 25% podílu na výrobě elektrické energie. [39]

Argumentem pro rozvoj větrné energetiky jsou také příznivé podmínky pro využití energie z větru na území České republiky a rovněž skutečnost, že v současné době je větrný potenciál České republiky využitý přibližně z 12,8 %. [1] V této záležitosti je na místě připomenout srovnání větrné energetiky na území České republiky a Rakouska, které bylo popsáno v subkapitole 5.1.2. Rakousko je zemí s podobným větrným potenciálem a podobnou hustotou zalidnění jako Česká republika, ovšem z hlediska instalovaného výkonu větrných elektráren je mezi těmito státy enormní rozdíl. Rakousko disponuje instalovaným výkonem větrných elektráren 3 045 MW, což je téměř desetinásobek ve srovnání s Českou republikou (320 MW).

Určitým signálem napovídající realizaci rozvoje větrné energetiky na území České republiky je skutečnost, že v současné době se již plánuje a posuzuje výstavba větrných elektráren Vestas s nominálním výkonem 3,0 - 3,3 MW. [39]

Jak již bylo zmíněno, rozvoj větrné energetiky na území České republiky v blízké budoucnosti nelze s jistotou předpovědět, nicméně na základě některých skutečností uvedených v této kapitole se její rozvoj jeví jako velmi pravděpodobný.

8 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl popsán přehled důležitých okruhů z oblasti větrné energetiky, respektive větrných elektráren. Ve druhé kapitole bylo popsáno, jaký význam představuje vítr jako obnovitelný zdroj. Ve třetí kapitole byla věnována pozornost historii větrné energetiky. Čtvrtá kapitola pojednávala o technickém řešení větrných elektráren, kde byly popsány jednotlivé komponenty současných větrných elektráren, včetně jejich nejmodernějších systémů. Pátá kapitola obsahovala přehled o větrné energetice v Evropě a v České republice, zároveň byly jejím obsahem statistické údaje o instalovaném výkonu větrných elektráren na území Evropy a České republiky v roce 2018. Šestá kapitola byla z hlediska tématu bakalářské práce nejdůležitější, byly v ní analyzovány vlivy větrných elektráren na životní prostředí z hlediska hluku, vlivů na krajinný ráz, vlivů na faunu (především avifaunu) a flóru, stroboskopického efektu, vlivů na půdu a vody a uvedeny ostatní vlivy. Sedmá kapitola se zabývala potenciálem rozvoje větrných elektráren na území České republiky.

Z provedené analýzy vlivů větrných elektráren na životní prostředí vyplývá, že větrné elektrárny jsou k životnímu prostředí velmi šetrné, protože neznečišťují ovzduší ani vodu, po ukončení jejich provozu dochází k obnovení funkčnosti půdních ploch a jejich vliv na faunu a flóru je v podstatě zanedbatelný.

Byl vyvrácen mýtus, že větrné elektrárny mají vysoký podíl na úmrtí ptactva. Samozřejmě nelze tvrdit, že ke kolizím ptačích druhů s listy rotoru větrných elektráren nedochází, nicméně podrobnými výzkumy bylo prokázáno, že větší podíl na úmrtnosti ptactva mají například stožáry elektrického vedení nebo třeba doprava.

Vyvrácen byl také mýtus, že větrné elektrárny jsou hlučné. Tento mýtus zřejmě pochází z doby, kdy větrné elektrárny ani zdaleka nebyly na takové technologické úrovni jako jsou dnes. Současně vyráběné a instalované větrné elektrárny jsou velmi moderní zařízení, která jsou stále zdokonalována a která prochází neustálým vývojem jak z hlediska technologií, tak z hlediska designu. Mechanický hluk je u současně vyráběných větrných elektráren již téměř eliminován a u hluku aerodynamického byl rovněž zaznamenán výrazný pokles jeho hladiny, což je důsledkem moderních konstrukcí listů rotoru.

Velice diskutovanou otázkou ve společnosti jsou dopady, respektive vlivy větrných elektráren na krajinný ráz. Výstavbou větrných elektráren se samozřejmě podobá

krajinného rázu významným způsobem změni, důležité je však v tomto případě estetické vnímání jednotlivého pozorovatele. Na jeho základě totiž větrná elektrárna může působit jako moderní prvek, který tvoří určitou „ozdobu“ krajinného rázu, nebo naopak jako prvek, který z estetického hlediska krajinný ráz silně poškozuje. Z tohoto důvodu je nemožné jednoznačně posoudit, zda větrné elektrárny krajinný ráz ovlivňují pozitivně nebo negativně, je to zkrátka věc názoru. Z hlediska vlivů větrných elektráren na krajinný ráz lze objektivně posoudit pouze skutečnost, že větrná elektrárna by neměla být postavena na chráněném území.

V nejbližších letech lze očekávat rozvoj větrné energetiky na území České republiky. Do roku 2025 musí 25 % vyrobené elektrické energie pocházet z obnovitelných zdrojů, přičemž v současnosti pochází z obnovitelných zdrojů 13,9 % vyrobené elektrické energie. Pro naplnění tohoto požadavku je větrná energetika ideálním řešením, a to hned ze dvou důvodů. Jednak je větrná energetika mimořádně šetrná k životnímu prostředí. Druhým důvodem je skutečnost, že větrný potenciál v České republice je využitý přibližně z 12,8 %. Rozhodujícím faktorem v tomto ohledu bude výše zelené dotace, která je v současnosti velmi nízká, resp. nyní nulová. Pokud se však má vyjít z požadavku pokrytí 25% podílu výroby elektrické energie obnovitelnými zdroji, je její opětné zavedení, příp. navýšení nutné, stejně tak jako navýšení instalovaného výkonu větrných elektráren v České republice.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] CETKOVSKÝ, Stanislav, Bohumil FRANTÁL, Josef ŠTEKL et al. *Větrná energie v České republice: hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí*. Studia Geographica 101. Brno: Ústav geoniky AV ČR. ISBN 978-80-86407-84-5.

[2] KOČ, Břetislav. Z historie větrných elektráren. *ELEKTRO: časopis pro elektrotechniku* [online]. ©2014 - 2018 FCC Public, s. r. o. [cit. 2018-11-03]. Dostupné na World Wide Web:

<<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektraren--13364>>

[3] ACKERMANN, Thomas, ed. *Wind power in power systems*. Chichester: Wiley, c2005. ISBN 0-470-85508-8.

[4] Z historie využívání energie větru v českých zemích. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2018-11-04]. Dostupné na World Wide Web:

<<http://www.csve.cz/cz/clanky/z-historie-vyuzivani-energie-vetru-v-ceskych-zemich/36>>

[5] Informace o větrné energetice. *SKUPINA ČEZ / VÝROBA ELEKTRINY* [online]. ©2018 ČEZ, a. s. [cit. 2018-11-04]. Dostupné na World Wide Web:

<<https://www.cez.cz/cs/vyroba-elekriny/obnovitelne-zdroje/vitr/informace-o-vetrne-energetice.html>>

[6] RETRO: První větrné elektrárny. *ecoFuture - ENERGIE PRO BUDOUCNOST* [online]. ©2018 E.ON [cit. 2018-11-06]. Dostupné na World Wide Web:

<<https://www.ecofuture.cz/clanek/retro-prvni-vetrne-elektrarny-4>>

[7] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.

[8] ČARNOGURSKÁ, Mária a Tomáš BRESTOVIČ. *Zdroje a premeny energie*. Košice: Technická univerzita v Košicích, Strojnícka fakulta, 2012. Edícia študijnej literatúry. ISBN 978-80-553-1013-8.

[9] LAPČÍK, Vladimír. *Wind farms and their impact on the environment* (kapitola v knize). In: *Wind Farm - Technical regulations, Potential estimation and Siting Assessment/Book 1* (book edited by Gastón Orlando Suvire). Chorvatsko, Rakousko: InTech, 2011, strany 141 - 162. ISBN 978-953-307-483-2.

[10] LAPČÍK, Vladimír. *Průmyslové technologie a jejich vliv na životní prostředí (monografie)*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, HGF, IEI, 2009. ISBN 978-80-248-2015-6.

[11] Betonový základ. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-01]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/clanky/betonovy-zaklad/305>>

[12] Příhradový stožár větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-02]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/cz/clanky/prihradovy-stozar-vetrne-elektrarny/228>>

[13] Stožár. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-02]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/cz/detail-kategorie/stozar/86>>

[14] Ocelový tubusový stožár. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-02]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/cz/clanky/ocelovy-tubusovy-stozar/229>>

[15] Větrné elektrárny v ČR obrazem. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-02]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/cz/fotogalerie/vetrne-elektrarny-v-cr-obrazem/7>>

[16] Prefabrikovaný betonový stožár větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-02]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/cz/clanky/prefabrikovany-betonovy-stozar-vetrne-elektrarny/227>>

[17] Fungování větrných elektráren (animace). *SKUPINA ČEZ / VÝROBA ELEKTRINY* [online]. ©2019 ČEZ, a. s. [cit. 2019-02-05]. Dostupné na World Wide Web:

< <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/vitr/flash-model-jak-funguje-vetrna-elektrarna.html>>

[18] Strojovna větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-05]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny/324>>

[19] PATEL, Mukund R. *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*. 2nd ed. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006. ISBN 0-8493-1570-0.

[20] Převodovka větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-05]. Dostupné na World Wide Web:

<<http://www.csve.cz/cz/clanky/prevodovka-vetrne-elektrarny/327>>

[21] Strojovna větrné elektrárny bez převodovky s multipólovým synchronním generátorem (výrobce ENERCON). *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-05]. Dostupné na World Wide Web:

<[http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-\(vyrobce-enercon\)/333#prettyPhoto](http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-(vyrobce-enercon)/333#prettyPhoto)>

[22] Spojení mezi převodovkou a generátorem. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-08]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/cz/clanky/spojeni-mezi-prevodovkou-a-generatorem/328>>

[23] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.

[24] Generátor větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-08]. Dostupné na World Wide Web:

<<http://www.csve.cz/cz/clanky/generator-vetrne-elektrarny/329>>

[25] GARCIA-SANZ, Mario a Constantine H. HOUPIS. *Wind energy systems: control engineering design*. Boca Raton: CRC Press, c2012. ISBN 978-1-4398-2179-4.

[26] Systém natáčení strojovny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-11]. Dostupné na World Wide Web:

<<http://www.csve.cz/cz/clanky/system-nataceni-strojovny/330>>

[27] Hydraulické systémy větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-12]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/cz/clanky/hydraulicke-systemy-vetrne-elektrarny/331>>

[28] BENDA, Vítězslav et al. *Obnovitelné zdroje energie (kolektivní monografie)*. Praha: Profi Press, 2012. ISBN 978-80-86726-48-9.

[29] MANWELL, J. F., J. G. McGOWAN a Anthony L. ROGERS. *Wind energy explained: theory, design and application*. Wiley, c2002. ISBN 0-471-49972-2.

[30] Konstrukce rotorového listu větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-16]. Dostupné na World Wide Web:

<<http://www.csve.cz/cz/clanky/konstrukce-rotoroveho-listu-vetrne-elektrarny/311>>

[31] Výroba rotorového listu větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-16]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/cz/clanky/vyroba-rotoroveho-listu-vetrne-elektrarny/315>>

[32] Vyhřívání rotorových listů větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-02-17]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/cz/clanky/vyhrevani-rotorovych-listu-vetrne-elektrarny/314>>

[33] Wind energy in Europe in 2018. *Wind EUROPE* [online]. ©2019 WindEurope asbl/vzw [cit. 2019-04-19]. Dostupné na World Wide Web:

<<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf>>

[34] Větrné elektrárny v ČR: 10x méně a patnáctkrát pomaleji než v podobném Rakousku. *Česká společnost pro větrnou energii* [online], publikováno 2019-02-21 [cit. 2019-04-20]. Dostupné na World Wide Web:

<<http://www.csve.cz/cz/vetrne-elektrarny-v-cr:-10x-mene-a-patnactkrat-pomaleji-nez-v-podobnem-rakousku-n/472>>

[35] Aktuální instalace. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. ©2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2019-04-20]. Dostupné na World Wide Web:

< <http://www.csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120>>

[36] LAPČÍK, Vladimír. *Oceňování antropogenních vlivů na životní prostředí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2440-6.

[37] LAPČÍK, Vladimír. Posuzování vlivů větrných elektráren na životní prostředí v České republice. *Acta Montanistica Slovaca*. 2008, ročník 13, číslo 3, str. 381 - 386. ISSN 1335-1788.

[38] Zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, ze dne 19. února, ve znění pozdějších předpisů. In: Sbírka zákonů České a Slovenské Federativní Republiky. Ročník 1992, částka 28, str. 666 - 692. Dostupný také na World Wide Web:

<<https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=1992&typeLaw=zakon&what=Rok&stranka=11>>

[39] LAPČÍK, Vladimír. *Ústní sdělení*. 15.04.2019

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

°C	stupeň Celsia
cm	centimetr
dB	decibel
GW	gigawatt
GWh	gigawatthodina
Hz	hertz
Kč	česká koruna
km/h	kilometr za hodinu
kW	kilowatt
m	metr
m/s	metr za sekundu
m ²	metr čtvereční
m ³	metr krychlový
mm	milimetr
MW	megawatt
MWh	megawatthodina
OPEC	Sdružení států vyvážejících ropu
ot./min.	otáčky za minutu
TWh	terawatthodina
V	volt

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 <i>Odkrytá základová spára</i> [11].....	12
Obrázek 2 <i>Noční osvětlení betonovaného základu</i> [11].....	13
Obrázek 3 <i>Hotový základ větrné elektrárny</i> [11].....	14
Obrázek 4 <i>Větrná elektrárna s ocelovým tubusovým stožárem</i> [15]	16
Obrázek 5 <i>Proces skružování</i> [14].....	17
Obrázek 6 <i>Skružené prstence</i> [14]	18
Obrázek 7 <i>Nástřik ochranné barvy na povrch segmentu stožáru</i> [14]	19
Obrázek 8 <i>Větrná elektrárna Führlander 2500 s příhradovým stožárem u obce Laasow v Německu; vedle elektrárny je vidět speciální jeřáb s lomeným ramenem, pomocí kterého byla elektrárna postavena</i> [12]	22
Obrázek 9 <i>Gondola větrné elektrárny Vestas V90 - 2,0 MW: 1 - řízení listů rotoru, 2 - válec regulace „pitch“, 3 - rotorová hlava, 4 - převodovka, 5 - generátor, 6 - transformátor, 7 - hydraulická jednotka</i> [9]	24
Obrázek 10 <i>Dvoustupňová planetová převodovka větrné elektrárny s výstupním koaxiálním stupněm od firmy Bosch-Rexroth s označením Redulus GPV pro výkon 2 MW</i> [20]	26
Obrázek 11 <i>Prstenec multipólového generátoru větrné elektrárny</i> [21]	27
Obrázek 12 <i>Elektropohon natáčení gondoly větrné elektrárny skládající se z elektromotoru s výkonem 2 kW, čtyřstupňové planetové převodovky, výstupního hřídele uloženého ve válečkovém ložisku a pastorku</i> [26]	29
Obrázek 13 <i>Pohled na fotovizualizované větrné elektrárny</i> [9]	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 <i>Vývoj výkonu a průměru rotoru větrných elektráren v letech 1985 - 2004 [3]</i>	8
Tabulka 2 <i>Přehled nově instalovaného výkonu větrných elektráren, instalovaného výkonu větrných elektráren vyřazených z provozu a celkového instalovaného výkonu větrných elektráren v členských státech Evropské unie v roce 2018 [33]</i>	40
Tabulka 3 <i>Vývoj instalovaného výkonu větrných elektráren a výroby elektrické energie z větru v České republice v období 2004 - 2018 [35]</i>	43
Tabulka 4 <i>Instalovaný výkon větrných elektráren v jednotlivých krajích České republiky ke dni 31. 12. 2018 [35]</i>	45
Tabulka 5 <i>Přehled instalovaného výkonu větrných elektráren v České republice podle výrobců ke dni 31. 12. 2018 [35]</i>	46

